Spektrum
DER WISSENSCHAFT

NOBEL-PREISE 2007

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT 12/07
DEZEMBER 2007

SERIE RAUMFAHRT (TEIL II)
Projekt Orion – Rückkehr zum Mond

SPINTRONIK
Quantencomputer mit Diamanten

KRANKHEITEN
Früherkennung durch Antikörper

SERIE: GEHIRN UND BEWUSSTSEIN (TEIL I)

Fenster zum Gehirn

Winzige Zuckungen der Augen verraten unbewusste Absichten

7,40 € (D/A) · 8,– € (L) · 14,– sFr
D6179E

www.spektrum.de

Reinhard Breuer
Chefredakteur

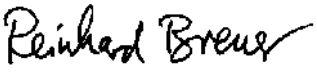
Nachdenken über komplexe Objekte

Artikel über Hirnforschung landen immer wieder auf unseren Titelseiten, zuletzt darüber, »Der Gedächtnis-Code« (SdW 10/2007, S. 46). Das ist auch kein Wunder: Nicht nur faszinieren uns die Themen Bewusstsein, Identität oder Gedächtnis; nicht nur bewegen uns Erkrankungen des Gehirns, etwa Demenz, Alzheimer oder Parkinson. Vielmehr werden dank immer raffinierterer Technologien und Experimente heute viele grundsätzliche Fragen und Mechanismen erforschbar, die über Jahrhunderte allenfalls als Gegenstand philosophischer Spekulationen galten.

Dass wir in dieser Ausgabe gleich eine vierteilige Serie über Gehirn und Bewusstsein starten, macht deutlich, wie sehr sich die Analyse des wohl komplexesten Gebildes im Universum in letzter Zeit weltweit intensiviert hat. Es geht dabei einerseits um Wissen. Tiefere Einblicke etwa in unterbewusste Gedankenprozesse, von denen ab S. 54 zu lesen ist, oder in den ominösen Zustand »Bewusstsein«, Thema des 2. Teils in unserer nächsten Ausgabe, greifen direkt in unsere Konzepte von Menschsein und Persönlichkeit ein. Andererseits haben die Erkenntnisse aber auch praktische Bedeutung. Das wird in den weiteren Folgen deutlich, die sich der Bewusstlosigkeit bei Anästhesie sowie den Wachkomapatienten widmen.

Die 6. Runde unserer Wunschartikel ist mit diesem Heft eingeläutet (www.spektrum.de/wunschartikel). Diesmal habe ich einen klaren Favoriten, aber ich verrate ihn noch nicht. Machen Sie mit!

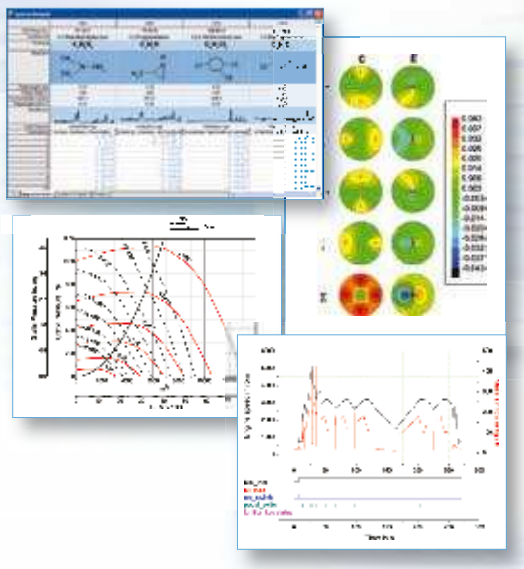
Herzlich Ihr



Unser Sonderheft »Ist das Universum ein Computer?« erscheint in diesen Tagen. Hinter dieser Frage verbirgt sich eine überraschende Erkenntnis: Hinreichend abstrakt betrachtet, unterscheidet sich der Lauf der Welt nicht wesentlich von der Arbeit eines Computers.

Dieser schon ältere Grundgedanke ist bis heute weiterentwickelt worden und hat sogar Anschluss an neueste Physik gefunden. Am Ende könnte der »rechnende Raum« die lang ersehnte Versöhnung der bislang unverträglichen Schwestern Quantenmechanik und Allgemeine Relativitätstheorie herbeiführen.

ORIGIN 8
Der Datenanalyse- und Grafik-Workspace



Highlights in Origin 8 (• neue Funktionen):

- Technische Graphen in Publikationsqualität
- Neue Arbeitsmappen mit mehreren Blättern und Arbeitsmappen-Manager
- Sparklines und Meta-Daten im Spaltenkopf
- Microsoft® Office Integration
- Grafikformate als Design speichern
- Neue Importformate: Axon pCLAMP®, ETAS INCA, imc FAMOS, Bild (BMP, GIF, JPG, uvm...), Kaleidagraph®, Minitab®, National Instruments DIAdem und TDM, netCDF, SigmaPlot®, uvm...
- Analysetemplates mit Autoaktualisieren
- Konsolidierte Reports für Ergebnisse
- X-Funktionen und Kommandofenster
- ActiveX® und COM Support
- Drag&Drop- import, -analyse & -visualize

- OriginPro 8 bietet alle Funktionen von Origin und darüber hinaus erweiterte Analysehilfsmittel für Statistik, 3D-Anpassung, Bild- und Signalverarbeitung.

Weitere Informationen zu Origin:
http://www.additive-origin.de/sdw

Kostenfreie Demoversion:
http://www.additive-origin.de/download

ADDITIVE
Soft- und Hardware für Technik und Wissenschaft

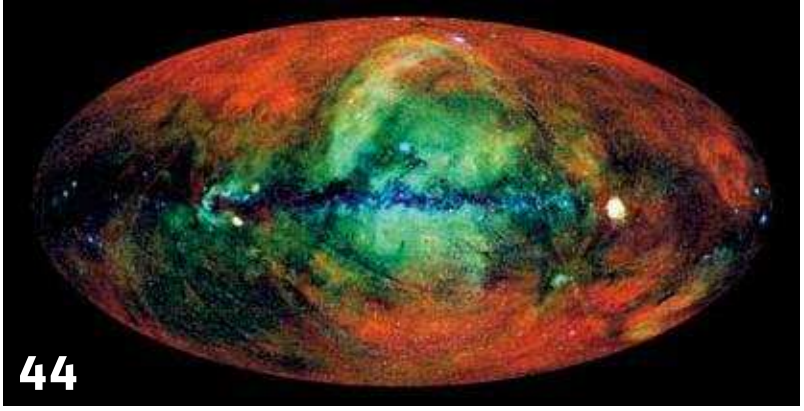
ADDITIVE GmbH
Max-Planck-Straße 22b · D-61381 Friedrichsdorf/Ts.
Telefon 06172-5905-(0)30 · Fax 06172-77613
E-Mail: origin@additive-net.de
www.additive-net.de • www.additive-origin.de

Copyright 2007 ADDITIVE GmbH. Alle Produktnamen sind eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Hersteller, Irrtum und Änderungen vorbehalten

INHALT

DEZEMBER 2007

MEDIZIN & BIOLOGIE **Gene für Alkoholismus**



ASTRONOMIE & PHYSIK **Neue Suchaktion für die Dunkle Energie**

MEDIZIN & BIOLOGIE **Krankheiten besser vorhergesagt**

AKTUELL

10 Spektrogramm
Echte Krokodilstränen · Neandertaler in Sibirien · Mondsüchtige Korallen · Haariger Tastsinn u. a.

13 Bild des Monats
Himmlischer Lichterglanz

16 Nobelpreis für Chemie
Reaktionen – oberflächlich betrachtet

18 Nobelpreis für Physik
Winzige Datenspeicher dank Riesenmagnetowiderstand

20 Nobelpreis für Medizin
K.-o.-Sieg für Mäuse und Menschen

22 Friedensnobelpreis
Eine grüne Entscheidung

22 Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften
Salomonische Urteile auf mechanischem Weg

27 Springers Einwürfe
Wirtschaftstheorie im Affenkäfig

ASTRONOMIE & PHYSIK

36 ▶ Der nächste Flug zum Mond
Der zweite Teil der Raumfahrtserie berichtet, wie die Nasa bis 2020 zu unserem Trabanten zurückkehren will

44 Dunkle Energie
Astrophysiker suchen nach der großen Unbekannten im All. Bald helfen neue Weltraumteleskope

50 Physikalische Unterhaltungen
Atome sind nicht wirklich harte Kugeln; aber häufig ist es möglich – und hilfreich –, so zu tun, als wären sie es

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial
8 Leserbriefe
8 Impressum
98 Im Rückblick
130 Vorschau

124 Rezensionen:
H. Koch – *Frauen und Schlangen*
H. Genz – *War es ein Gott?*
G. Börner – *Schöpfung ohne Schöpfer?*
H. W. Roesky – *Glanzlichter chemischer Experimentierkunst*

MEDIZIN & BIOLOGIE

TITELTHEMA

54 ▶ Fenster zum Gehirn
Winzige Augenzuckungen sind nicht nur für das Sehen unerlässlich, sondern verraten auch geheime Absichten

62 Vererbte Trunksucht
Erbanlagen tragen erheblich zum Alkoholismusrisiko bei. Gerade darum ließe sich der Krankheit besser vorbeugen

70 ▶ Prognose von Diabetes und Co.
Bald werden Ärzte drohende Autoimmunleiden wie Rheuma oder multiple Sklerose vorzeitig erkennen

80 Essay: Linné als Computerfreak
Arten sammeln, bestimmen, beschreiben – wie können Linnés Erben, die Taxonomen, ihr verstaubtes Image abschütteln?

Titelmotiv: Corbis-Zefa, Jens Nieth

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

TITELTHEMA

Fenster zum Gehirn 54

88

ERDE & UMWELT

Landwirtschaft für neun Milliarden

112

TECHNIK & COMPUTER

Spintronics für Quantencomputer

ERDE & UMWELT

88 **Welternährung in der Zukunft**
Die heutige Landwirtschaft dürfte neun Milliarden Menschen, wie sie die Erde (mindestens) bevölkern werden, kaum mehr ernähren können. Mit dem Übergang von ein- zu mehrjährigen Kulturpflanzen würden sich zumindest einige Agrarprobleme lösen lassen

MENSCH & GEIST

100 **Die Vorfahren der Wikinger**
Im Lauf weniger Jahrhunderte wurde aus Bauern mit Häuptlingen ein Volk von Kriegern und Königen

108 **Junge Wissenschaft**
Auf dem diesjährigen »European Contest for Young Scientists«: Tropfendynamik, Asteroideneinschläge, Selbstverteidigung der Pflanzen und eine Fußtastatur für Computer

TECHNIK & COMPUTER

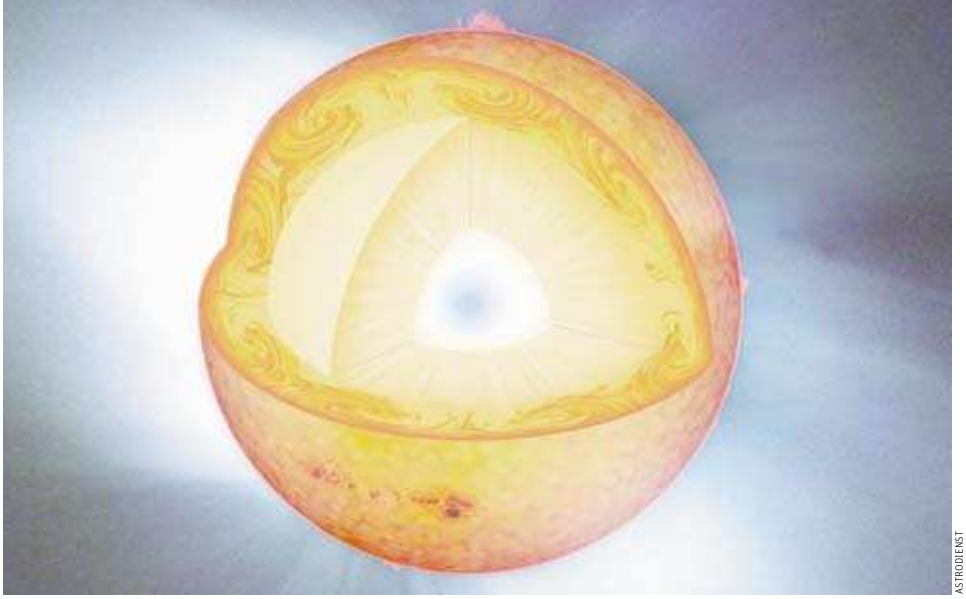
112 ▶ **Spintronik mit Diamant**
Die Zukunft von Quantengeräten liegt auf Diamanten gebettet. Dieses Material ist ideal für Elektronik, die den Spin der Elektronen ausnutzen

122 **Wissenschaft im Alltag**
Harte Schale, brüchiger Kern – Nüsseknacken im Industriemaßstab heißt: rohe Kräfte sinnvoll walten lassen

Thema der Woche

e·on
Neue Energie

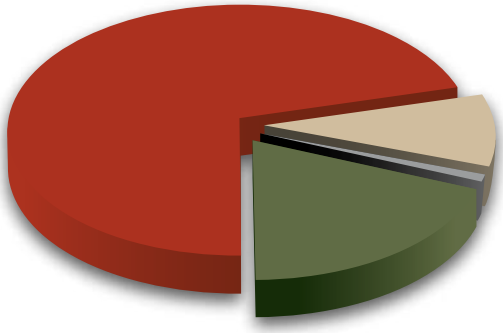
ONLINE



ASTRODIENST

FÜR ABONNENTEN »Anatomie der Sonne«

www.spektrum-plus.de



TIPPS Wählen Sie Ihren Wunschartikel!

www.spektrum.de/artikel/910775

FREIGESCHALTET »Entscheidung am Nil«

www.epoc-magazin.de/artikel/910784

spektrumdirekt

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Schwächen in der Verteidigung

Ständig versuchen Viren, Bakterien oder Parasiten in unseren Körper einzudringen. Meist ohne Erfolg, denn der Körper setzt komplexe Abwehrketten gegen die Eindringlinge in Gang. Doch mitunter versagt das Immunsystem oder tut, wie bei Autoimmunkrankheiten, zu viel des Guten

www.spektrumdirekt.de/immunsystem

Artenvielfalt – und Artensterben

Noch ist die globale Biodiversität nicht in ihrem gesamten Ausmaß bekannt, und doch fegt wohl schon die sechste große Aussterbewelle in der Erdgeschichte durch Fauna und Flora. Wodurch sind die Arten gefährdet, wie könnten sie gerettet werden?

www.spektrumdirekt.de/artenvielfalt

TIPPS

Neu im Netz! WISSENSlogs

Jetzt online: unser Blogportal zur Wissenschaft. Renommierte Wissenschaftler, Journalisten und Praktiker bloggen hier über Entdeckungen sowie aktuelle Debatten, Erfahrungen und Ansichten. So nehmen sie auch das Wechselspiel von Gesellschaft und Wissenschaft in den Blick. Diskutieren Sie mit auf

www.wissenslogs.de

10 Jahre Spektrum Online

Ende 1997 – das WWW war gerade acht Jahre alt – startete der »Spektrum Ticker«. Als einer der ersten Verlage im deutschsprachigen Raum veröffentlichte Spektrum der Wissenschaft täglich Meldungen aus der Welt der Forschung

www.spektrumdirekt.de/artikel/910591

INTERAKTIV

Wählen Sie Ihren Wunschartikel!

- »Keine Staus auf der Datenautobahn«
- »Thermodynamik der Fortbewegung«
- »Die Vielen Welten des Hugh Everett«
- »Naturschutz zum Wohl des Menschen«
- »Weniger Krebs durch Vitamin D?«

Wählen Sie aus und gewinnen Sie ein Wochenende in Heidelberg!

www.spektrum.de/artikel/910775

Kalmar des Grauens

Ein Tsunami, ein Tiefsee-Ungeheuer, ein deutscher Forscher vor der Chance seines Lebens, eine Neuseeländerin vor den Trümmern ihrer Existenz: Aus diesem Stoff ist der Wissenschaftsthriller »Der Rote« gewebt. Nach unseren 5x5-Kriterien können Sie ihn auch selbst bewerten! Die Rezension finden Sie auf

www.spektrumdirekt.de/artikel/910222

FÜR ABONNENTEN

»Anatomie der Sonne«

Alles Licht, das wir von der Sonne empfangen, stammt aus einer nur wenige hundert Kilometer dicken äußeren Schicht, der Photosphäre. Doch dieses Wissen genügt, um auf den inneren Aufbau des gigantischen Glutballs schließen zu können. Bestätigung findet unser Sonnenmodell durch Neutrinos – geisterhafte Teilchen, die im Zentrum des Sterns entstehen und ihn dennoch nahezu ungehindert verlassen

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

»Die Neurobiologie des Selbst«

Wie entsteht das dauerhafte Erleben der eigenen Identität? Forscher verstehen allmählich, wie Kinder lernen, »ich« zu sagen

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE UNTER

www.spektrum.de/artikel/872447

»Entscheidung am Nil«

1798 schlug ein britischer Flottenverband jene französische Flotte, die zuvor Napoleons Expeditionsheer nach Ägypten gebracht hatte – ein großer Schritt zur Herrschaft der Briten über die Weltmeere. Gedruckt erscheint dieser Beitrag in **epoc**, der Fortführung des erfolgreichen und nun um historische Themen erweiterten Magazins **Abenteuer Archäologie**

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON epoc UNTER

www.epoc-magazin.de/artikel/910784

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

Spektrum.de

Heftarchiv
www.spektrum.de/archiv

Spektrum Notizen
www.spektrum.de/notizen

Spektrogramm
www.spektrum.de/spektrogramm

Spektrum Tagebuch
www.spektrum.de/tagebuch

Spektrum zum Hören
www.spektrum.de/hoeren

Spektrum in die Schulen
www.spektrum.de/wis

Der Mathematische Monatskalender
www.spektrum.de/monatskalender

Leserbriefe
www.spektrum.de/leserbriefe

Newsletter
www.spektrum.de/newsletter

DIESE UND WEITERE RUBRIKEN FINDEN SIE AUF DER NAVIGATIONSLEISTE UNSERER HOMEPAGE

Bei erneuerbaren Energien sind wir in unserem Element.

Für die sichere und umweltfreundliche Energieversorgung von morgen werden erneuerbare Ressourcen immer wichtiger. Weil sie unerschöpflich sind. Deshalb setzen wir bereits seit Jahren alle unsere Energie daran, Wind, Wasser, Sonne und auch Biomasse effektiv zu nutzen. Allein in Deutschland können wir mit unseren modernen Wasserkraftwerken, Windparks oder Bio-Gasanlagen bereits jetzt so viel Strom aus erneuerbaren Energien erzeugen, dass eine Millionenstadt wie Berlin allein damit versorgt werden könnte. Und in Zukunft wollen wir noch viel mehr in alternative Ideen investieren. Damit Ihre Energie auf Dauer gesichert ist.

Mehr zu unserem Engagement für erneuerbare Energien erfahren Sie unter www.eon.com

e·on
Neue Energie

Dieses Gemälde der Bildertrilogie von Peter Uhlemann zeigt ein überflutetes Bamberg ohne Menschen.

FRANZ PETER SCHMITZ, LÜNEBURG

Bilder einer zerfallenden Stadt

Erde ohne Menschen, November 2007

Besonders interessant fand ich den Aspekt des Beitrags, welche menschlichen Artefakte wie lange überdauern werden. Überrascht hat mich allerdings die Aussage, dass Ratten zu den »Verlierern« eines Verschwindens der Menschen gezählt werden. Nach meinem Kenntnisstand profitieren Ratten zwar von den Menschen, benötigen sie jedoch nicht zum Überleben.

Angesprochen hat mich der Artikel vor allem deshalb, weil wir vor mehr als 25 Jahren eine Bildertrilogie erworben haben, die den Titel »Stadt ohne Menschen« trägt. Die drei Bilder des bekannten fränkischen Malers Peter Uhlemann zeigen Ansichten eines zerfallenden Bamberg, die in einer Urwaldlandschaft, in einer Wüste und in einer überfluteten Umgebung dargestellt werden. Die Ähnlichkeiten mit den Darstellungen zum Artikel sind faszinierend, wie am obigen Beispiel zu sehen ist.

Dr. Franz Peter Schmitz, Lüneburg

Neue Qualität in Selbstorganisation

Was ist Leben?, Oktober 2007

Am Schluss dieses Essays begründet der Autor seine Ablehnung einer starren Zweiteilung in belebte und unbelebte Natur mit einer zu großen Vereinfachung des Problems. Ich halte diese Auffassung für zu dogmatisch. Vielmehr sollte man die Frage, was Leben ist, nicht nur von dessen Beginn, sondern auch dessen Ende her aufrollen.

Was ist denn der Tod eines Lebewesens? Naturwissenschaftlich gesehen doch wohl ein Sprung vom Leben in das Nichtleben, nämlich durch den rein chemischen Prozess der Verwesung. Sollte nicht deshalb umgekehrt der Beginn des Lebens auch ein qualitativer Sprung von der unbelebten zur belebten Natur sein? Nicht dass Leben auf chemische und auch physikalische Funktionen verzichten könnte. Meines Erachtens besteht die neue Qualität in der Selbstorganisation, mit der chemische und physikalische Prozesse zur Erfüllung der besonderen Lebensaufgaben eingesetzt und gesteuert werden.

Dr. Eckart Lefringhausen, Geldern

Patient schmerzfreier, Zahnarzt schwerhörig

Zähnebohren ohne Schmerzen, Wissenschaft im Rückblick, April 2007

Sie geben fälschlicherweise die Zahl der Umdrehungen pro Minute für neue Motoren bei Zahnärzten mit 50 000 an. Ich weiß mit Sicherheit, dass es 500 000 Umdrehungen pro Minute waren, ich war nämlich einer der Ersten, die diesen Motor benutzten. Die angegebene Schmerzlosigkeit war aber nur eine teilweise, da die punktförmige Berührungsfläche im Zahn sofort erhitzt wurde. Später, bis auf den heutigen Tag eingeführte Verbesserungen mit zwangsläufiger Wasserspraykühlung der Bohrspitze brachten eine weit gehende, aber nicht totale Schmerzreduktion.

500 000 Umdrehungen pro Minute wurden in praxi nicht erreicht; unter Belastung 360 000 bis 400 000. Das antreibende Turbinenrad war nur ein kleines Zahnrädchen von etwa 8 Millimeter

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels;
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Susanne Baghestani, Bernhard Gerl, Dr. Claudia Hecker, Dr. Rainer Kayser, Dr. Ursula Loos, Dr. Andrea Pastor-Zacharias, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/sFr 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten.
Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an.
Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls;
Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-150, Fax 030 6159005;
Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-184, Fax 040 30183-283;
Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099;
Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555;
Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49;
München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 28a vom 01. 01. 2007.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2007 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, President: Steven Yee, Vice President and Managing Director, International: Dean Sanderson, Vice President: Frances Newburg, Circulation Director: Christian Dorbrandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

Gesittet oder freizügig

Wellness in der Antike, Juli 2007

Auf die Fragen eines Lesers, ob die Römer damals getrenntgeschlechtlich badeten und ob mit oder ohne Badebekleidung, antwortet der Autor Theodor Kissel:
Zunächst muss ich gleich vorausschicken, dass man, gerade was diese Fragen betrifft, keine allgemein verbindlichen Antworten treffen kann – hierzu ist die Quellenlage überraschenderweise zu spärlich, bisweilen widersprüchlich.

Zur Frage nach der Geschlechtertrennung beim Baden:
Hier muss man zunächst unterscheiden zwischen so genannten »öffentlichen Bädern« *(balnea publica)* und »privaten Bädern« in den Villen der vornehmen Römer. Dann noch einmal zwischen den öffentlichen Bädern in Rom und denen im Süden Italiens, vor allem in Kampanien, wo man es für gewöhnlich mit der Moral nicht ganz so streng nahm wie im etwas prüderen Rom (wie gesagt: ich spreche hier von »öffentlichen Bädern«; was in den Privatvillen hinter verschlossenen Türen »abging«, steht auf einem anderen Blatt).

Nach allem, was wir bisher wissen, scheint es zumindest im 1. Jahrhundert n. Chr. für bestimmte Bäder in Kampanien (nur für diese Region besitzen wir diesbezüglich klare Aussagen) keine Geschlechtertrennung beim Baden gegeben zu haben. Das berichtet der römische Naturschriftsteller Plinius. Ein weiteres Indiz für das gemeinsame Baden von »Weiblein und Männlein« im 1. Jahrhundert n. Chr. liefert eine kaiserliche Verordnung aus dem 2. Jahrhundert n. Chr., welche die unter Caligula und Nero »eingerissene Unsitte des gemischten Badens« in so genannten *balnea mixta* ausdrücklich verbot.

Daneben gibt es aber auch Zeugnisse, die dafür sprechen, dass auch im 1. Jahrhundert n. Chr. gemischtes Baden nicht überall praktiziert wurde: Für die Trennung von Männer- und Frauenbädern gibt es inschriftliche Belege, die beispielsweise die Wiederherstellung von zwei Männerbädern und einem Frauenbad bezeugen. Ferner forderte der römische Bauschriftsteller Vitruv (1. Jahrhundert n. Chr.) ausdrücklich, dass die Warmwasserbereiche (Caldarium) der Männer- und Frauenbäder (aus rein zweckmäßigen Gründen) nebeneinander liegen sollten, »um ihnen eine gemeinsame Heizung geben zu können«. Auch der römische Schriftsteller Varro (1. Jahrhundert n. Chr.) weist in seiner Erläuterung des Begriffs »öffentliche Bäder« auf eine Verdoppelung hin; in einem Teil der Anlage wüschen sich die Männer, im anderen die Frauen.

Zur Frage des Nacktbadens:
Hier ist die Sachlage eindeutiger. Gebadet wurde im Allgemeinen nackt, und auch in der Palaestra (einer Spielstätte), wo man griechischem Brauch folgte, wurde nackt geturnt oder Ball gespielt. Weiterhin wurde auch das Sonnenbad, die *apricatio*, überlicherweise nackt genommen. Dieses ungezwungene Nacktsein in »öffentlichen Bädern« scheint allerdings nicht in den so genannten *balnea mixta* kultiviert worden zu sein, da der römische Satiredichter Martial einmal davon berichtete, dass die Frauen beim Baden einen Schurz tragen, das *subligar*, und diese Bemerkung macht wahrscheinlich nur dann Sinn, wenn beide Geschlechter gemeinsam badeten – so zumindest die Meinung einiger Althistoriker.

Die Sachlage ist nicht immer so eindeutig wie oftmals in populärwissenschaftlichen Abhandlungen dargestellt.

Durchmesser mit 6 bis 8 Zähnchen, das durch einen starken Luftstrahl angeblasen wurde. Dabei ergab sich ein Sireneneffekt von 36 Kilohertz Ultraschall – für das menschliche Ohr nicht hörbar.

Er reichte aber aus, um dem betreffenden Zahnarzt nach einigen Jahren das innere Ohr zu zerstören. So sind viele meiner Kollegen, wie ich auch, im Alter schwerhörig bis taub geworden.

Dr. Herbert Hohn, Wiesbaden

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:
Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Ozonzerstörung durch Raketenabgase

FCKWs nicht schuld am Ozonloch?
Spektrogramm, November 2007

In diesem Beitrag wird gesagt, dass Chlor ein massiv ozonschichtschädigendes Gas ist. Laut den Autoren verursacht durch FCKWs entstandenes Chlor nur etwa 40 Prozent des Ozonlochs. Als weitere relevante Quelle für Chlorgas würde ich Raketenstarts vorschlagen. Beim Abbrennen des Treibstoffs der so genannten Booster (bei Spaceshuttlestarts verwendet) wird unter anderem Chlorgas freigesetzt. Die Gesamtmasse mag relativ gering sein, doch während des Flugs brennen die Booster bis in etwa 45 Kilometer Höhe. Es wird also die gesamte ozonhaltige Stratosphäre mit Abgasen verunreinigt. Der Treibstoff besteht zu 68,83 Prozent aus Perchlorat, welches wiederum zu etwa 35,68 Prozent aus Chlor besteht. Also bestehen etwa 25 Prozent des Treibstoffs aus Chlor, welches als Gas freigesetzt wird. Bei einem Booster mit einer Treibstoffmasse von etwa 500 Tonnen entspricht das 123,4 Tonnen Chlor pro Booster, also beispielsweise mindestens 200 Tonnen Chlorgas pro Shuttlestart. Gibt es hierzu bereits Theorien?

Hans Byrtus, Hallbergmoos

Antwort der Redaktion:
Das Problem der Ozonzerstörung durch Raketenabgase ist schon lange bekannt. Noch ist der Beitrag dieser Abgase sehr gering, doch nimmt seine Bedeutung in dem Maße zu, wie die anderen Chlorquellen durch das Montreal-Protokoll weniger werden.

Erratum

Bessere Vorhersagen
von Waldbränden, November 2007

Bei der Bildlegende auf S. 95 haben wir die Angabe der Bildagentur ungeprüft übernommen. Andritsaina ist jedoch keineswegs eine Hafenstadt, sondern ein 750 Meter hoch gelegenes Bergdorf.

Drei Tränchen quellen aus dem Auge dieses fressenden Alligators.

UNIVERSITY OF FLORIDA

ECHSEN

Krokodilstränen sind echt

■ Wer Trauer über ein Ereignis heuchelt, das ihn insgeheim freut, weint laut Volksmund Krokodilstränen. Diese Redensart wurzelt in einem alten Mythos, wonach die Echsen beim Fressen ihrer Beute scheinheilig Tränen der Reue vergießen. Niemand hielt das in unserer wissenschaftlich aufgeklärten Welt noch für glaubhaft. Tatsächlich lässt es sich auch schwer überprüfen, da Krokodile ihre Opfer im Allgemeinen im Wasser verschlingen, wo Tränen kaum auszumachen sind.

Der Zoologe Kent Vliet von der Universität von Florida in Gainsville wollte es nun jedoch genau wissen. Als Untersuchungsobjekte wählte er vier Kaimane und drei Alligatoren aus einem Tierpark. Um die Fütterungen besonders attraktiv zu gestalten, sind diese Echsen darauf trainiert worden, ihre Beute an Land zu verspeisen. Das nutzte der Forscher, um bei den Vorführungen speziell die Augen unter die Lupe zu nehmen. Und siehe da: Den meisten Panzerechsen, nämlich fünf von sieben, kamen beim Fressen die Tränen. In einigen Fällen benetzten die Tropfen nicht nur einfach das Auge, sondern warfen Blasen und wurden schaumig.

Über die Ursache rätselt Vliet noch. Dass die Tiere so zartfühlend sind, sich über die unglücklichen Opfer ihrer Fressgier zu grämen, glaubt er freilich nicht. Seine vorläufige Erklärung lautet vielmehr: Da Krokodile ihre Beute meist laut schnaubend und prustend verschlingen, entsteht in ihren Nebenhöhlen ein hoher Luftdruck, der die Tränenflüssigkeit herauspresst und sie dabei teilweise aufschäumt.

BioScience, Bd. 57, in Druck

GESICHTSERKENNUNG

Aufmerksamkeit für Ängstliche

■ Glückliche Gesichter sieht man gerne, und ein nettes Lächeln wirkt ansteckend. Doch wer seinen Blick durch eine Menschenmenge schweifen lässt, registriert die fröhlichen Mienen zuletzt; am schnellsten rücken Personen mit ängstlichem Blick in unser Bewusstsein. Diese überraschende Tatsache hat ein Team um Randolph Blake von der Vanderbilt-Universität in Nashville (Tennessee) jetzt herausgefunden.

Informationen über Gesichter werden normalerweise innerhalb von 40 Millisekunden im Gehirn verarbeitet – zu rasch, um Unterschiede in der Schnelligkeit der Wahrnehmung zu messen. Darum entwickelte Blake für seine Versuche eine Methode zum Herabsetzen der Verarbeitungsgeschwindigkeit: Sie traktierten das eine Auge der Probanden mit rasanten Bildfolgen, während sie dem anderen das ruhende Testgesicht präsentierten. Wegen der Reizüberflutung auf der einen Seite dauerte es bis zu zehn Sekunden, ehe das statische Gesicht ins Bewusstsein drang.

Nach neuesten Erkenntnissen reagiert unser Gehirn auf ängstliche Gesichter schneller als auf glückliche.

VANDERBILT UNIVERSITY

Wann dies genau geschah, hing dabei deutlich vom Ausdruck ab. War er glücklich, dauerte es am längsten, bis das Gehirn Notiz von ihm nahm. Am schnellsten wurden ängstliche Mienen wahrgenommen, neutrale lagen dazwischen.

Zur Erklärung meinen die Forscher, das Gehirn habe Mechanismen entwickelt, Bedrohungen möglichst prompt zu erfassen. Ängstliche Gesichter könnten Gefahr signalisieren. Eine glückliche Miene sei dagegen ein Zeichen von Sicherheit, die keine unmittelbare Aufmerksamkeit erfordere.

Emotion, Bd.7, Nr. 4, im Druck

PLANETEN

Eisfontänen aus Tigerstreifen

■ Riesige Geysire schleudern am Südpol des Saturnmonds Enceladus Gas und Eis ins All. Wo sie genau entspringen, war bisher allerdings unbekannt. Als wahrscheinliche Quelle galten vier etwa 130 Kilometer lange, fast parallele Risse, welche die eisige Oberfläche des völlig zugefrorenen Trabanten durchziehen: die so genannten Tigerstreifen »Alexandria«, »Kairo«, »Bagdad« und »Damaskus«.

Durch die Analyse von Bildmaterial der Raumsonde Cassini konnten Joseph Spitale und Carolyn Porco vom Space Science Institute in Boulder (Colorado) diese Vermutung nun bestätigen. Die Forscher lokalisierten die Ausgangspunkte von acht Geysiren. Tatsächlich lagen sie alle in den Tigerstreifen – und zwar an deren wärmsten Stellen, wie thermische Untersuchungen zuvor gezeigt hatten. Die ergiebigsten Quellen fanden sich in den Spalten »Bagdad« und »Damaskus«.

Dieses Falschfarbenbild der Cassini-Sonde von Enceladus zeigt die Fontänen aus kleinen Eiskristallen, die vom Südpol des Saturnmonds ins All schießen.

NASA, JPL / SSI UND CASSINI IMAGING TEAM

Woher stammt die Wärme? Offenbar entsteht sie, weil in den tief reichenden Klüften im Untergrund der Tigerstreifen die Gesteinsschichten aneinanderreiben. Der kleine Enceladus umkreist den Saturn nämlich auf einer ellipsenförmigen Bahn, wodurch sich seine Entfernung zu dem Riesenplaneten ständig ändert. Folglich wirken unterschiedliche Gezeitenkräfte auf ihn ein – je nachdem, wie nahe er dem Saturn gerade ist. Durch die Reibungswärme sublimiert ein Teil des Eises und entweicht, wobei der Dampf kleine Eiskristalle mitreißt.

Nature, Bd. 449, S. 695

Spezielle Rezeptoren, die auf blaues Licht reagieren, richten die innere Uhr von Korallen nach den Mondphasen aus.

OVE HØEGH-GULDBERG, CENTRE FOR MARINE STUDIES, UNIVERSITY OF QUEENSLAND

FORTPFLANZUNG

Mondsüchtige Korallen

Jedes Frühjahr ist das Great Barrier Reef vor der Ostküste Australiens Schauplatz eines außergewöhnlichen Naturschauspiels: Wie auf Kommando stoßen hunderte Korallenarten bei abnehmenden Vollmond ihre Samen und Eizellen synchron ins Meer hinaus – in der Hoffnung, dass sie zueinanderfinden.

Doch woher wissen die Polypen, wann die Zeit zum Laichen gekommen ist? Frühere Analysen hatten angedeutet, dass sie empfindlich auf blaues Licht reagieren – ebenso wie viele Insekten und Säugetiere. Diese haben dazu spezielle Rezeptoren, die Chryptochrome.

Verfügen auch Blumentiere über solche Detektoren? Um das zu prüfen, verglichen Forscher um Ove Hoegh-Guldberg von der Universität von Queensland in Brisbane (Australien) die Zusammensetzung eines Proteins, das bei der Korallenart *Acropora millepora* von dem Gen *cry2* kodiert wird, mit den Chryptochromen von Taufliegen, Mäusen, Krallenfröschen und Zebrafischen.

Die Übereinstimmungen in den Aminosäuresequenzen erwiesen sich als so groß, dass die Rezeptoren von *A. millepora* sogar ein Vorläufer der Chryptochrome sein könnten. Deren evolutionärer Ursprung würde demnach bis ins Präkambrium zurückreichen.

Eine Analyse der Genaktivität von *cry2* zu unterschiedlichen Jahreszeiten bestätigte zugleich: In Vollmondnächten im Frühling produzieren die Korallen besonders viele Rezeptorproteine, durch die sich ihre innere Uhr offenbar an die Mondphasen anpasst – und damit das synchrone Laichen koordiniert.

Science, Bd. 318, S. 467

REGENERATION

Stammzellschwund im Alter

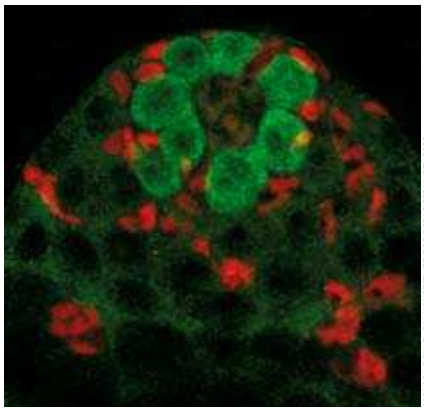
Ein alternder Körper büßt zunehmend die Fähigkeit zur Selbsterneuerung ein – mit der Folge, dass Gewebe und Organe funktionsunfähig werden. »Stammzellersatztherapie« heißt deshalb die Hoffnung der Medizin, die manch einer sogar als »Tor zur Unsterblichkeit« bezeichnet.

Tatsächlich ist es die Aufgabe so genannter Stammzellen, Ersatz für defektes Gewebe zu produzieren. Sie selbst bleiben gleichsam alterslos. Wie sich nun herausstellte, können sie die ewige Jugend allerdings nicht ohne Nachbarschaftshilfe bewahren. Die so genannte Stammzellnische gibt wichtige Kommandos zur Teilung und Regeneration der Nachschublieferanten. Ist sie zu alt, kann sie die nötige Unterstützung nicht mehr gewähren.

Zu diesem Ergebnis kam eine Forschergruppe um Leanne Jones vom Salk Institute for Biological Studies in La Jolla (Kalifornien) bei Untersuchungen an Hoden der Taufliege. Die Wissenschaftler entdeckten, dass alte Tiere den für die Erhaltung der dortigen Stammzellen essenziellen Wachstumsfaktor *unpaired (upd)* kaum noch produzierten. Folglich verkümmerte das Stammzellreservoir.

Das dürfte laut Jones Auswirkungen auf Ersatztherapien haben. Da die Patienten meist älter sind, kann die Mikro-Umgebung die transplantierten Stammzellen vermutlich nicht mehr angemessen unterstützen. Die Behandlung hält deshalb nicht lange vor. Sinnvoller könnte es sein, die fehlenden Wachstumsfaktoren zuzuführen.

Cell Stem Cell, Bd. 1, S. 458



MONICA BOYLE, SALK INSTITUTE FOR BIOLOGICAL STUDIES

Dank Signalen aus der Umgebung entstehen bei der Teilung von Stammzellen (dunkelgrün) an der Hodenspitze von Taufliegen nicht nur Vorläufer von Spermien (rot), sondern auch frische Stammzellen (hellgrün).

CARLES LALUEZA-FOX, UPF BARCELONA

Ein Forscher aus Leipzig beim Präparieren eines Neandertaler-Knochens für die DNA-Untersuchung

FRÜHMENSCHEN

Neandertaler in Sibirien

■ Die Spur des Neandertalers verliert sich in Richtung Osten – obwohl es an fossilen Überresten eigentlich nicht mangelt. Da die Fundstücke aber nur unvollständig erhalten sind, ist ihre Zuordnung oft nicht eindeutig. Das macht es schwer, das Verbreitungsgebiet unseres engsten Verwandten unter den Frühmenschen klar einzugrenzen.

Forscher um Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig prüften daher jetzt die genetische Ähnlichkeit europäischer Neandertaler mit Hominiden aus Asien: zwei Erwachsenen aus der Okladnikow-Höhle im Altai-Gebirge in Südsibirien nahe der Mongolei und dem so genannten Jungen von Teshik Tash in Usbekistan. Dieser hatte bisher die mutmaßliche Ostgrenze des Lebensraums von *Homo neanderthalensis* markiert.

Aus seinem Oberschenkelknochen sowie aus Oberarm- und Fingerknochen der sibirischen Frühmenschen isolierte das Team von Pääbo die Mitochondrien-DNA (mtDNA) und sequenzierte sie. Das Ergebnis verglichen die Forscher mit den bislang 13 entzifferten europäischen mtDNAs. Wie sich zeigte, liegen die Sequenzen eines der beiden sibirischen Erwachsenen und des Jungen von Teshik Tash innerhalb der Variationsspanne des hiesigen Neandertalers. All diese Hominiden gehörten folglich derselben Art an. Anatomische Studien hatten das zwar zuvor schon nahegelegt, aber nicht eindeutig beweisen können.

Der Neandertaler ist somit – vermutlich durch eine Warmzeit vor etwa 125 000 Jahren begünstigt – bis nach Sibirien vorgestoßen. Die Grenze seines Verbreitungsgebiets muss demnach 2000 Kilometer ostwärts verschoben werden.

Nature, Bd. 449, S. 902

WAHRNEHMUNG

Haariger Tastsinn

■ Viele Teile unseres Körpers sind von winzigen beweglichen Wimpern bedeckt. Diese »Zilien« haben diverse Aufgaben. So befördern sie Schmutzpartikel aus der Lunge. Desgleichen ist unser Innenohr mit Zilien ausgekleidet – werden sie durch Schall gekrümmt, hören wir Töne.

Wie ebenfalls schon länger bekannt ist, spielen die Flimmerhärchen auch beim Sehen und Riechen eine Rolle. Aber das ist noch nicht alles. Nun haben Wissenschaftler um Nicholas Katsanis von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) entdeckt, dass die wimpernartigen Strukturen bei einem weiteren der fünf Sinne mitmischen: dem Tastempfinden.

NICHOLAS KATSANIS, JOHNS HOPKINS MEDICINE

Das Immunfluoreszenzbild zeigt einen dünnen Fortsatz (rot), der von einer Nervenzelle aus dem dorsalen Wurzelganglion der Maus ausgeht.

Die Forscher züchteten Mäuse mit defekten Zilien und prüften, wie schnell die Tiere mechanischem Druck oder Hitze auswichen. Tatsächlich reagierten die Nager ohne Flimmerhärchen stark verzögert. Sie könnten die Reize zwar noch wahrnehmen, folgern die Forscher, doch sei die Schwelle erhöht, ab der sie etwas fühlten.

Bei mikroskopischen Untersuchungen zeigte sich schließlich, dass aus den Zellkörpern sensorischer Neuronen Zilien entspringen. Diese haben nach Ansicht von Katsanis die Aufgabe, Ionenkanälen in der Zellmembran den richtigen Platz zuzuweisen. Sitzen diese Kanäle an der falschen Stelle, könnten die Nervenzellen womöglich nicht adäquat auf Reize reagieren.

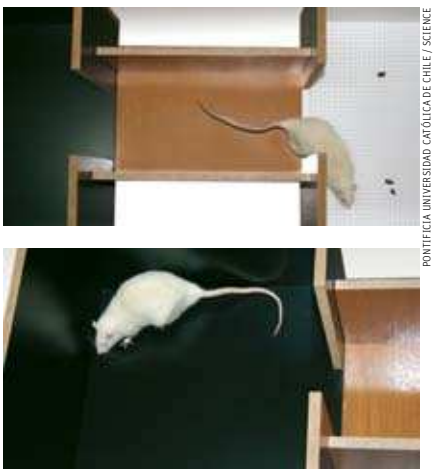
Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd. 104, S. 17524

NEURONEN

Suchtzentrale im Gehirn

■ Tief im Inneren unserer Großhirnrinde liegt jenes Areal, das Emotionen und Empfindungen koordiniert: die Insula. Obwohl die Region nicht größer als eine Zwei-Euro-Münze ist, beherbergt sie ein umfassendes Archiv unserer Erfahrungen. Was dort gespeichert wurde, zieht das Hirn bei allen künftigen Entscheidungen zu Rate. Deshalb steht die Insula auch im Verdacht, bei Suchtkranken den erneuten Griff zur Droge zu fördern. Waren die Erfahrungen nach dem Konsum angenehm, merkt sie sich das und weckt die Lust auf Wiederholung.

Wissenschaftler um Fernando Torrealba von der Universität von Chile haben dies nun im Tierversuch überprüft. Sie verabreichten amphetaminabhängigen Ratten einen Wirkstoff, der die Aktivität der Insula vorübergehend lahmlegt. Tatsächlich vergaßen die pelzigen Probanden schon kurz nach der Injektion ihr Verlangen und zeigten auch keine Entzugserscheinungen. Im Gegenteil: Die Nager bevorzugten plötzlich wieder den schwarzen Bereich ihres Käfigs, nachdem sie sich zuvor – entgegen ihrer instinktiven Vorliebe – meist in einem hellen Abschnitt aufgehalten hatten, in dem sie die Amphetamine bekamen. Allerdings kehrte das Verlangen wieder, sobald die Wirkung der Blockade nachließ.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE / SCIENCE

Nach der Blockade einer bestimmten Hirnregion bevorzugen amphetaminsüchtige Ratten wieder den dunklen Raum statt dem hellen, wo sie die Droge bekommen.

Science, Bd. 318, S. 655

Mitarbeit: Christoph Marty und Anna Siever

Himmlischer Lichterglanz

Rund 20 000 Lichtjahre entfernt liegt in einem Spiralarm der Milchstraße einer der größten kosmischen Kreißsäle: der Starburst Cluster NGC 3603. Dort erblickten vor ein bis zwei Millionen Jahren Tausende von Sternen auf einmal das Licht der Welt – die meisten davon deutlich massereicher als die Sonne. Während sie selbst, dicht zusammengedrängt, mit ihrem bläulichen Schein wie Diamanten in einem Schmuckkästchen glitzern, bringt ihre Strahlung umgebende Wolken aus interstellarem Gas zum Glühen. Die neue Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops zeigt ein 17 Lichtjahre breites Gebiet.

NASA, ESA UND HUBBLE HERITAGE (STSCI / AURA) COLLABORATION

NOBELPREIS FÜR CHEMIE

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Reaktionen, oberflächlich untersucht

Der Chemie-Nobelpreis ging an Gerhard Ertl vom Fritz-Haber-Institut in Berlin für seine exemplarischen Untersuchungen der chemischen Abläufe an technisch wichtigen Katalysatoren.

FRITZ-HABER-INSTITUT DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Gerhard Ertl vom Fritz-Haber-Institut in Berlin hat mit einer Vielfalt physikalischer Untersuchungsmethoden die molekularen Mechanismen aufgeklärt, nach denen chemische Reaktionen an Oberflächen ablaufen.

Von Werner Gans

Chemie und Reagenzglas sind für viele Menschen untrennbare Begriffe. Ein großer Teil der chemischen Vorgänge spielt sich jedoch nicht in Flüssigkeiten, sondern auf festen Oberflächen ab – der Katalysator beim Auto ist das wohl bekannteste Beispiel. Schon lange nutzen Chemiker Metalloberflächen, um den Energieberg, welchen jede chemische Reaktion überwinden muss, abzusenken und so die Umsetzung zu erleichtern.

Ein berühmtes Beispiel für eine solche Katalyse ist das Haber-Bosch-Verfahren zur Ammoniaksynthese aus Stickstoff und Wasserstoff. Es hat vor allem deshalb eminente wirtschaftliche Bedeutung erlangt, weil es den Weg zum Kunstdünger ebnete. Fritz Haber und Carl Bosch haben es gemeinsam entwickelt und 1910 patentiert. Haber wurde dafür 1918 mit dem Chemienobelpreis ausgezeichnet, während Bosch den Preis 1931 für seine Beiträge zur Hochdruckchemie erhielt. Das nach beiden benannte Verfahren nutzt als Katalysator fein verteiltes Eisen, dem Kaliumhydroxid beigemischt ist, auf einem keramischen Trägermaterial.

Auch nach jahrzehntelangem industriellem Einsatz und weiterer Optimierung blieb der genaue Mechanismus der Reaktion

$$N_2 + 3\,H_2 \longrightarrow 2\,NH_3$$

bis in die 1970er Jahre unbekannt. Die Bruttogleichung sagt schließlich nichts über die Einzelschritte der Umsetzung aus. Zweifellos werden zunächst Stickstoff und Wasserstoff an der Oberfläche des Eisens adsorbiert, also angelagert. Aber was geschieht dann? Reagieren die zweiatomigen Moleküle direkt miteinander oder werden sie zuvor in Atome gespalten? Diese Frage war ungeklärt.

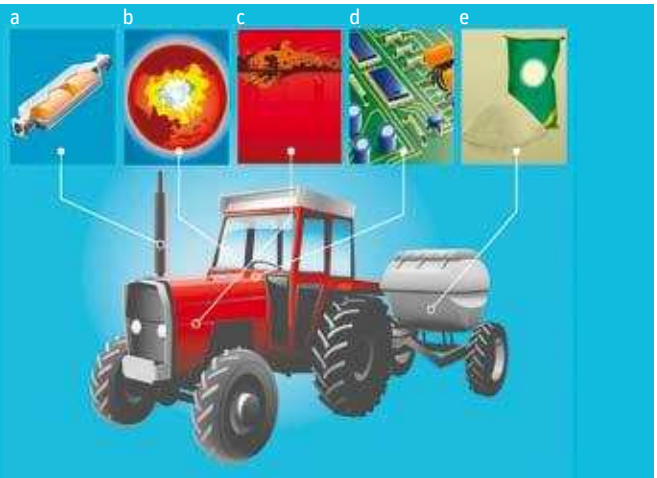
Gerhard Ertl, damals noch an der Universität München, fand die Antwort. Davor allerdings beschäftigte er sich mit der Adsorption von Wasserstoff auf Metalloberflächen. 1912 hatte Paul Sabatier für seine Arbeiten zur Hydrierung organischer Verbindungen in Gegenwart von feinem Metallstaub den Nobelpreis erhalten. Auch dieses Verfahren wurde jahrzehntelang angewendet, ohne dass etwas über den Zustand von Wasserstoff auf Metalloberflächen bekannt war.

Ertl konnte Mitte der 1970er Jahre zeigen, dass das Gas in diesem Fall atomar gebunden ist. Dazu nutzte er unter anderem eine damals neu entwickelte Methode namens LEED *(low energy electron diffraction)*. Niederenergetische Elektronen, die an einer Metalloberfläche mit regelmäßig angeordneten Atomen gestreut werden, liefern dabei ein Beugungsmuster, dem sich die Anordnung der Atome entnehmen lässt.

Nach diesen Untersuchungen war klar, dass auch beim Haber-Bosch-Verfahren der Wasserstoff auf der Eisenoberfläche atomar vorliegt. Aber wie steht es mit dem Stickstoff? Im gasförmigen, zweiatomigen Zustand enthält er eine sehr feste Dreifachbindung. Könnte sie wirklich bei der Adsorption aufgebrochen werden?

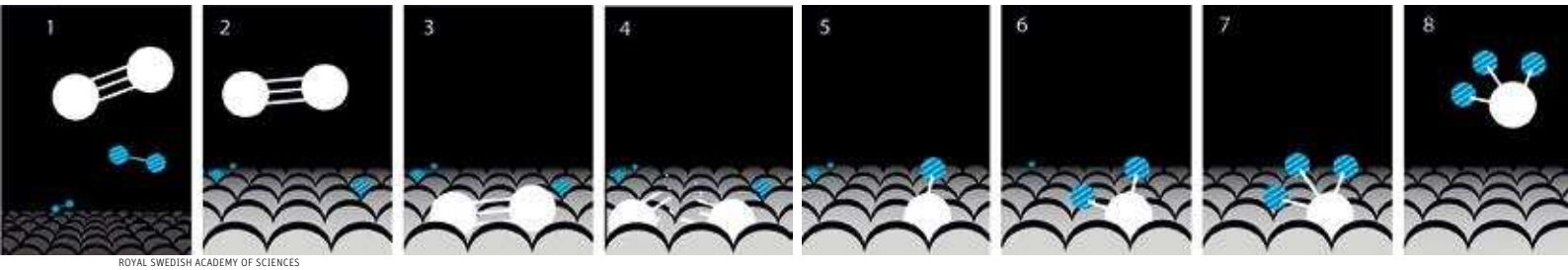
Zur Prüfung setzte Ertl eine weitere neuartige Methode ein: die Photoelektronenspektroskopie (PES). Dabei misst man die kinetische Energie von Elektronen, die bei Bestrahlung mit kurzwelligem, monochromatischem (einfarbigem) Licht freigesetzt werden. Sie gibt nicht nur Aufschluss über die Art eines Atoms, sondern auch über seinen Bindungszustand. So ließ sich atomarer von molekularem Stickstoff unterscheiden.

Auf diese Weise konnte Ertl nachweisen, dass auf reinen Eisenoberflächen tatsächlich Stickstoffatome vorkommen. Zudem ermittelte er die Geschwindigkeit



ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Ein Traktor veranschaulicht die große Bedeutung der Oberflächenchemie im Alltag. Sie spielt eine Rolle im Abgaskatalysator (a), beim Rosten (c) und bei der Herstellung von Elektronikbausteinen (d) sowie von Kunstdünger (e). Auch der Abbau der Ozonschicht (b) durch Fluorchlorkohlenwasserstoffe, die früher in Kühlern eingesetzt wurden, läuft teilweise über katalytische Reaktionen an Oberflächen – in diesem Fall von Eiskristallen.



ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Der Nobelpreisträger konnte den molekularen Ablauf der Ammoniaksynthese nach dem Haber-Bosch-Verfahren aufklären. Demnach werden Wasserstoff- und Stickstoffmoleküle an der Oberfläche des Katalysators adsorbiert und dann in Einzelatome gespalten (1 – 4). Der Bruch der Dreifachbindung im Distickstoff (4) ist der langsamste Schritt, der die Geschwindigkeit der Gesamtreaktion bestimmt. An die Stickstoffatome binden sich dann etappenweise drei Wasserstoffatome (5 – 7), und das fertige Ammoniakmolekül löst sich vom Katalysator ab (8).

ihrer Bildung. Dabei zeigte sich, dass die Spaltung des Stickstoffmoleküls ein sehr langsamer Vorgang ist. Damit war erwiesen, dass es sich um den geschwindigkeitsbestimmenden Schritt der Ammoniaksynthese handelt. Soll die Reaktion schneller ablaufen, muss man ihn beschleunigen.

Insgesamt ergaben sich für die Umsetzung folgende mutmaßliche Elementarschritte: Adsorption und Spaltung der Wasserstoff- und Stickstoffmoleküle an der Oberfläche des Katalysators, Bildung von NH, NH_2 und NH_3 in adsorbiertem Zustand sowie schließlich die Desorption von NH_3 (Bild oben).

Da die letzten Schritte sehr schnell sind, ließen sie sich im normalen Reaktionsverlauf nicht verfolgen. Um sie auch untersuchen und messen zu können, wandte Ertl einen Trick an. Dabei machte er sich zu Nutze, dass die Reaktion umkehrbar ist: Nur bei hohem Druck und tiefen Temperaturen vereinigen sich Stickstoff und Wasserstoff zu Ammoniak, bei tiefem Druck und hohen Temperaturen zersetzt sich NH_3 dagegen unter fortschreitender Abspaltung von H-Atomen in seine Komponenten. Indem Ertl diese Zersetzung an Eisen untersuchte und sich von adsorbiertem Ammoniak bis zu den adsorbierten Stickstoff- und Wasserstoffatomen zurückarbeitete, konnte er auch die schnellen Schritte einzeln untersuchen und verifizieren.

All diese Experimente fanden an reinen Eisenoberflächen im Vakuum statt. Der industrielle Katalysator enthält jedoch zusätzlich ein keramisches Trägermaterial sowie beigemischtes Kaliumhydroxid und arbeitet unter hohem Druck. Waren die Modellergebnisse überhaupt auf den technischen Prozess übertragbar? Um das zu prüfen, wiederholte Ertl einen Teil seiner Versuche mit industriell verwendeten Katalysatoren. Dabei fand er eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen, die er am Modellsystem gewonnen hatte.

Außerdem untersuchte Ertl die industriell verwendeten Katalysatoren mit einer dritten, damals brandneuen Methode: der Auger-Elektronenspektroskopie (AES). Sie ähnelt der Photoelektronenspektroskopie, allerdings wird die Energie von »Sekundärelektronen« gemessen, die bei der Reorganisation der Elektronenhülle nach dem Herausschlagen eines kernnahen Elektrons austreten. Sie liefern noch genauere Aussagen über die Bindungsverhältnisse. Dadurch konnte Ertl auch die Rolle des Kaliumhydroxids klären. Es wird unter den Einsatzbedingungen des Katalysators zu Kalium reduziert. Die Kaliumatome an der Oberfläche aber beschleunigen die Adsorption und Spaltung von Stickstoffmolekülen, weil sie Elektronendichte auf die Eisenatome übertragen.

Wellen und Chaos

Als dritte klassische Oberflächenreaktion untersuchte Ertl schließlich die Reaktion von Kohlenmonoxid mit Sauerstoff auf Platin (Spektrum der Wissenschaft 2/1997, S. 82). Sie spielt eine wichtige Rolle im Abgaskatalysator von Automobilen. Den Nobelpreisträger aber reizte vor allem, dass dabei nichtlineare Effekte auftreten, die zu Oszillationen, Selbstorganisation, chemischen Wellen und Chaos führen können. Um die Ursache zu ergründen, fuhr Ertl wieder eine eindrucksvolle Batterie moderner Untersuchungsmethoden auf. Sie umfasste neben der schon erwähnten LEED die Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR), die Informationen über die Wechselwirkung zwischen adsorbiertem Molekül und Oberfläche liefert, sowie die Photoelektronen-Emissionsmikroskopie (PEEM), mit der sich die räumliche Anordnung der verschiedenen Oberflächenatome bildlich darstellen lässt.

Als Hauptursache der Nichtlinearität erwies sich eine durch die Adsorption von Kohlenmonoxid verursachte Strukturänderung der Platinoberfläche. Zerschneidet man das Edelmetall entlang bestimmter Kristallebenen, ordnen sich die Atome dort um, damit sich die Oberflächenspannung verringert. Die Adsorption von Kohlenmonoxid ist aber auf der Original-Kristallfläche energetisch günstiger. Ab einer bestimmten Bedeckung reicht die Energiedifferenz aus, dass die Platinatome wieder dieselbe Anordnung wie im Kristallinnern annehmen.

Auch Sauerstoff zieht eine solche unmodifizierte Oberfläche vor und lagert sich nun in großen Mengen an. Dort kann es mit dem Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid zu reagieren. Dieses löst sich ab, und die nun wieder nackte Oberfläche kehrt zur modifizierten Struktur zurück. So kommt es zu einem stetigen An- und Abschwellen der Reaktion. Die Reaktionsfront breitet sich dabei wellenartig aus.

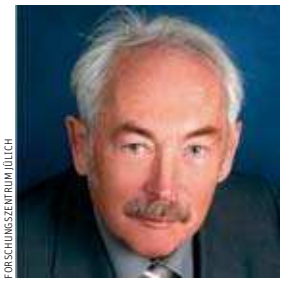
Mit seinen Arbeiten hat Ertl Standards für die Untersuchung von chemischen Reaktionen an Oberflächen gesetzt. Nicht nur die Vielfalt der angewandten Methoden ist beeindruckend, sondern auch die Fähigkeit des Preisträgers, wissenschaftliche Probleme bis zum Ende zu durchdenken und systematisch einer Lösung zuzuführen.

Werner Gans ist theoretischer Chemiker und arbeitet an der Freien Universität Berlin – seit September als Koordinator der Dahlem Research School.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Winzige Datenspeicher dank Riesenmagnetowiderstand

Wechselschichten aus Chrom und Eisen lassen sich magnetisch zwischen einem Zustand hoher und niedriger elektrischer Leitfähigkeit schalten. Für diese technisch wichtige Entdeckung erhielten Peter Grünberg und Albert Fert den Physiknobelpreis.



FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

CHRISTOPHE LEBEDINSKY, CNRS PHOTOLIBRARY

Peter Grünberg (links) vom Forschungszentrum Jülich und **Albert Fert** von der Université Paris-Sud lösten mit der Entdeckung des Riesenmagnetowiderstands eine Revolution in der digitalen Speichertechnologie aus.

Von Claus M. Schneider

Mit der Verleihung des diesjährigen Physik-Nobelpreises an die Entdecker des Riesenmagnetowiderstands hat die Schwedische Akademie der Wissenschaften eine herausragende wissenschaftliche Leistung gewürdigt, die auch eine einmalige Erfolgsgeschichte in der Festkörperforschung darstellt: Wissenschaftlicher und technologischer Fortschritt gingen Hand in Hand. Der Riesenmagnetowiderstands- oder GMR-Effekt (englisch: *giant magnetoresistance*) dient heute in fast jeder Festplatte zum Auslesen der Daten. Diese sind in winzigen Bereichen unterschiedlicher Magnetisierung gespeichert. Ein Sensor, der den GMR-Effekt nutzt, registriert die kleinen Unterschiede als große, messbare Stromschwankung und arbeitet daher hochempfindlich.

Generell ändert sich der elektrische Widerstand eines Materials in Anwesenheit eines Magnetfelds. Ein sehr interessanter Fall tritt ein, wenn das Medium, durch das der Strom fließt, aus einem Ferromagneten wie Eisen besteht. Das Material weist dann selbst schon eine Magnetisierung auf: Die magnetischen Momente zeigen alle in die gleiche Richtung. In diesem Fall wird der elektrische Widerstand durch die Stärke dieser Magnetisierung und ihre Orientierung relativ zur Fließrichtung des elektrischen Stroms bestimmt. Diesen »anisotropen Magnetowiderstand« oder kurz AMR (englisch: *anisotropic magnetoresistance*) hat schon vor mehr als 150 Jahren Lord Kelvin beobachtet.

Der AMR rührt daher, dass Elektronen außer ihrer negativen Ladung einen so genannten Spin besitzen. Diese quantenmechanische Größe ist eng mit ihrem magnetischen Moment verknüpft. In einem Ferromagneten können sich die Elektronenspins parallel oder antiparallel zur Magnetisierungsrichtung anordnen. Folglich zerfällt der elektrische Strom in zwei Anteile: einen mit parallelem (»spin up«) und einen mit antiparallelem Spin (»spin down«). Der AMR entsteht nun dadurch, dass das Ausmaß der Streuung eines Elektrons von der Orientierung seines Spins relativ zu seiner Bewegungsrichtung abhängt. Je stärker und häufiger aber das Elektron gestreut wird, desto höher ist der elektrische Widerstand.

Hürdenlauf für Elektronen

Obwohl der Effekt schwach ist – die Widerstandsänderung beträgt nur ein bis zwei Prozent –, fand der AMR anfangs Anwendung in magnetischen Sensoren und in Leseköpfen von Festplattenlaufwerken. Damals, Mitte der 1980er Jahre, fußte diese Technologie auf über drei Jahrzehnten intensiver Forschung und Optimierung und schien ausgereizt.

Es war daher eine Sensation, als 1988 die Gruppen von Albert Fert an der Université Paris-Sud und Peter Grünberg am Forschungszentrum Jülich unabhängig voneinander einen viel größeren Magnetowiderstandseffekt in metallischen Schichtsystemen beobachteten *(Physical Review Letters, Bd. 61, S. 2472, und Physical Review B, Bd. 39, S. 4828)*. Zwei Jahre vorher hatte Grünberg das Phänomen der Zwischenschicht-Austauschkopplung entdeckt *(Physical Review Letters, Bd. 57, S. 2442)*: Sind zwei Eisenschichten durch eine nur wenige Atomlagen dicke Chromschicht getrennt, reagieren sie magnetisch nicht mehr unabhängig, sondern nehmen zueinander entgegengesetzte, antiparallele Magnetisierungen an. Nur mit einem externen Magnetfeld lässt sich eine parallele Ausrichtung erzwingen.

Diese neue Möglichkeit, zwischen zwei magnetisch stark unterschiedlichen Konfigurationen zu schalten, stimulierte weitere Ideen. Durch den AMR war bekannt, dass spinpolarisierte Elektronen durchaus mehrere Nanometer in einem Material zurücklegen, bevor sie erneut gestreut werden. Dieser Abstand entspricht der von Grünberg verwendeten Dicke der Chrom-Zwischenschicht. Wenn aber die spinpolarisierten Elektronen beim Passieren dieser Schicht ihre Spinorientierung beibehalten, sollte das Umschalten vom antiparallelen zum parallelen Zustand einen messbaren Unterschied im elektrischen Widerstand ergeben.

Das experimentelle Ergebnis übertraf alle Erwartungen. Die Gruppe von Grünberg fand Widerstandsänderungen von 1,5 Prozent in moderaten Magnetfeldern. Das überstieg den AMR einer vergleichbar dicken einzelnen Eisen-

schicht um rund das Zehnfache. In der Veröffentlichung im März 1989 bezeichnete Grünberg den Effekt in seiner zurückhaltenden Art als »erhöhten Magnetowiderstand«. Er erkannte allerdings das technologische Potenzial. Schon Anfang 1988 hatte er unter der Bezeichnung »Magnetfeldsensor mit ferromagnetischer dünner Schicht« ein Patent angemeldet, das sich schnell als Basis der modernen magnetischen Datenspeicherung erweisen und dem Forschungszentrum Jülich Einnahmen in zweistelliger Millionenhöhe bescheren sollte.

Fert und seine Mitarbeiter untersuchten zur gleichen Zeit periodische Eisen-Chrom-Multilagen und fanden dort Widerstandsänderungen von mehr als fünfzig Prozent bei tiefen Temperaturen und hohen Magnetfeldern. Sie prägten in ihrer Veröffentlichung im August 1988 dafür den heute üblichen Begriff Riesenmagnetowiderstand.

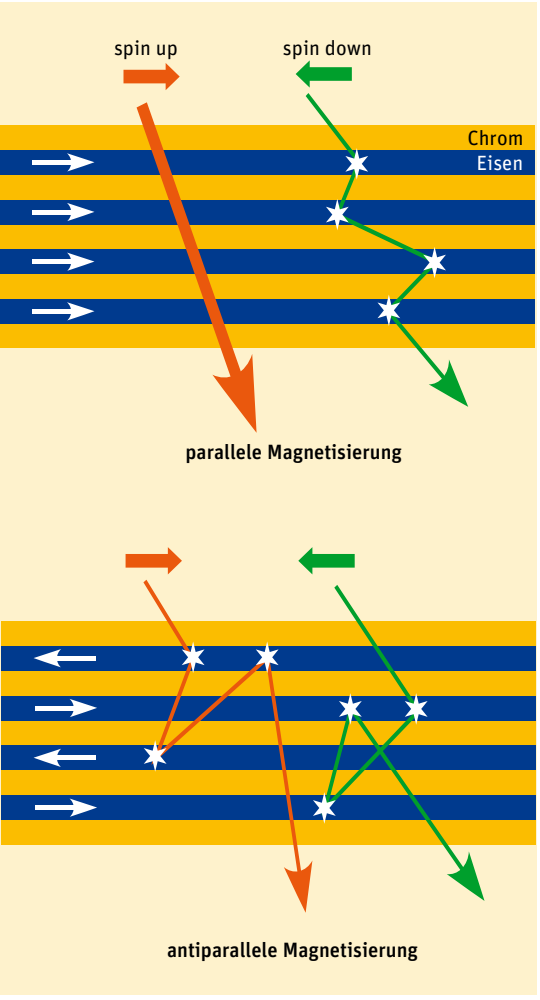
Fert formulierte außerdem einen mikroskopischen Mechanismus für den GMR-Effekt, bei dem die spinabhängige Streuung von Ladungsträgern an den Grenzflächen zwischen Eisen und Chrom eine zentrale Rolle spielt. Das erklärte auch den Unterschied zu Grünbergs Resultaten: Das Multischichtsystem enthält mehr Grenzflächen und zeigt daher einen höheren Magnetowiderstand.

Die Streuung wird dabei nicht mehr – wie beim AMR – durch die schwache »Spin-Bahn-Kopplung«, sondern durch die stärkere Austauschwechselwirkung zwischen den Spins bewirkt. Sie ist dadurch wesentlich effizienter, was deutlich größere Magnetowiderstandswerte ergibt. Zugleich lässt sich über die Schichtmagnetisierung die Spinorientierung der Elektronen und damit die Stärke der Streuung gezielt ändern.

In der parallelen Konfiguration werden Elektronen mit »spin up« kaum an den Grenzflächen gestreut (Bild unten). Dies liegt daran, dass in einem Ferromagneten prinzipiell weniger freie »spin up«-Zustände existieren, in denen ein solches Elektron bei der Streuung landen kann. Für »spin down«-Elektronen gibt es dagegen mehr erreichbare freie Zustände. Daher werden sie stärker gestreut – insbesondere beim Übertritt von der Zwischen- in die Ferromagnet-Schicht. Alles in allem erhöht sich somit der Widerstand für den »spin down«- und erniedrigt sich für den »spin up«-Strom. Da der letztgenannte Effekt deutlich überwiegt, bleibt der Gesamtwiderstand R_p gering.

Man beachte, dass sich die Eigenschaft »spin up« und »spin down« immer auf die lokale Magnetisierungsrichtung bezieht. In der parallelen Anordnung ist diese überall gleich. Bei der antiparallelen Konfiguration aber kehrt sie sich regelmäßig um. Durchquert nun ein »spin up«-Elektron die Chromschicht und dringt in die benachbarte Eisenlage ein, wird es dort jetzt praktisch als »spin down«-Elektron behandelt und somit stärker an der Grenzfläche gestreut. In der nächsten Eisenschicht, hat es dann wieder »spin up«-Charakter. Dadurch gleichen sich die »spin up«- und »spin down«-Ströme an, und der Gesamtwiderstand R_{ap} steigt. Als Magnetowiderstands-Wert wird meist die Größe $\Delta R/R_p = (R_{ap} - R_p)/R_p$ angegeben.

FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH



In Eisen/Chrom-Multilagensystemen lässt sich durch ein äußeres Magnetfeld die Magnetisierung aller Eisenschichten parallel ausrichten (oben). Elektronen, deren Spin auch in diese Richtung weist, können dann fast ungehindert hindurchfließen. Nur Elektronen, deren Spin entgegengesetzt orientiert ist, werden merklich gestreut. Beim Abschalten des äußeren Magnetfeldes nimmt das Multilagensystem dagegen einen Zustand ein, in dem sich die Magnetisierung von einer Eisenschicht zur nächsten jeweils umkehrt (unten). In dieser antiparallelen Orientierung werden alle Elektronen unabhängig von ihrer Spinrichtung in jeder zweiten Eisenlage stark gestreut, was zu einem sehr viel höheren Gesamtwiderstand führt.

Festplatten im Streichholzformat

Auch die Industrie erkannte die praktische Bedeutung der Entdeckung von Grünberg und Fert sehr schnell: Schon 1997 kam der erste GMR-Lesekopf für Computerfestplatten auf den Markt. Diese ließen sich dadurch auf das Format von Streichholzschachteln verkleinern, sodass sie heute auch in transportablen MP3-Playern (iPod), Camcordern oder Mobiltelefonen einsetzbar sind. Daneben finden GMR-Sensoren auf vielen weiteren Technologiefeldern Anwendung, etwa als Lenkwinkelsensor in Kraftfahrzeugen oder in anderen Gebieten des Maschinenbaus.

Die Entdeckung des GMR begründete ein eigenes, hochaktuelles Gebiet, in dem das Forschungszentrum Jülich auch heute sehr aktiv ist: die Spinelektronik. Sie verfolgt derzeit eine Vielzahl paralleler Linien. Ein prominentes Beispiel ist der Tunnelmagnetowiderstand, der auf dem spinabhängigen »Tunneln« von Elektronen durch eine Isolatorschicht zwischen zwei ferromagnetischen Schichten beruht. Er ist technologisch hochinteressant, weil magnetische Tunnelkontakte auf Abmessungen unter hundert Nanometer miniaturisiert werden können. Sie eignen sich damit ideal für nichtflüchtige Arbeitsspeicher in Computern, deren Inhalt auch nach dem Ausschalten erhalten bleibt.

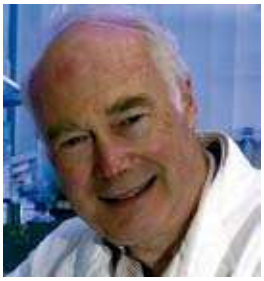
Die Entdeckung von Albert Fert und Peter Grünberg hat innerhalb weniger Jahre eine ganz neue Sicht auf spinabhängige Transporteffekte eröffnet und damit den Grundstein für eine Entwicklungsrichtung der Informationstechnologie gelegt, die große Bedeutung für die Zukunft hat.

Claus M. Schneider ist Direktor der Instituts »Elektronische Eigenschaften« am Forschungszentrum Jülich, in dem Peter Grünberg den Riesenmagnetowiderstand entdeckt hat.

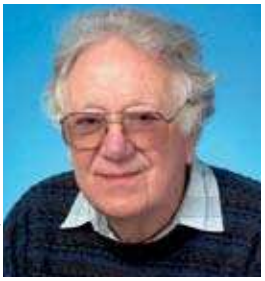
 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

K.-o.-Sieg für Mäuse und Menschen

Der diesjährige Nobelpreis für Medizin gilt der Knock-out-Maus. Die drei Laureaten entwickelten Methoden, mit denen sich gezielt Gene der Nager ausschalten und somit Modellsysteme für menschliche Erbkrankheiten erzeugen lassen.


CARDIFF UNIVERSITY

DIRK DOUGLASS, UNIVERSITY OF UTAH


DAN SEARS, UNIVERSITY OF NORTH CAROLINA

Martin J. Evans von der Universität Cardiff (links) gelang erstmals die Züchtung embryonaler Stammzellen. **Mario R. Capecchi** vom Howard Hughes Medical Institute in Salt Lake City (Utah) und **Oliver Smithies** von der Universität von North Carolina in Chapel Hill (rechts) entwickelten das Verfahren zum gezielten Genaustausch durch homologe Rekombination.

Von Michael Groß

Knock-out-Mäuse sind als Vehikel der medizinischen Grundlagenforschung inzwischen so selbstverständlich, dass unsereiner den Begriff oft ohne weitere Erklärung verwendet oder nur dazusagt, in diesen Mäusen sei ein bestimmtes Gen ausgeschaltet. Das hört sich so einfach an wie das Betätigen eines Lichtschalters. Doch in Wirklichkeit war der Weg zum gezielten Ausknipsen von Genen sehr mühsam. Die Preisträger Martin Evans, Oliver Smithies und Mario Capecchi mussten eine Reihe neuer – und anfangs fast aussichtslos scheinender – Methoden entwickeln, die erst nachträglich in der heute so erfolgreichen Knock-out-Technik konvergierten.

Züchtung von Stammzellen

Einen Grundstein legte Martin Evans, heute an der Universität Cardiff, indem er als Erster embryonale Stammzellen züchtete. Es ist eine bemerkenswerte politische Entscheidung der Stockholmer Akademie, diese Arbeit in Zusammenhang mit Knock-out-Mäusen zu ehren. Zweifellos hätte es nähergelegen, ihre Rolle bei der späteren Entwicklung menschlicher Stammzellen zu würdigen. Evans haben die Juroren mit ihrer Zuordnung sicher keinen Gefallen getan. Die mit genmanipulierten Mäusen durchgeführten Experimente wirken auf die militanten Tierschützer im Vereinigten Königreich nämlich wie ein rotes Tuch, während die Stammzellforschung auf der Insel kaum Proteste weckt.

Als Erstes gelang es Evans in den frühen 1970er Jahren, Krebszellen aus so genannten Teratomen zu kultivieren. Das sind Tumore, welche nicht aus dem eigenen Gewebe des befallenen Organs hervorgehen, sondern aus »übrig gebliebenen« undifferenzierten Embryonalzellen. Evans konnte sie in Kulturschalen wachsen lassen und dazu bringen, sich auszudifferenzieren, also verschiedene Gewebetypen zu bildeten – zum Beispiel Hautzellen oder sogar Herzmuskel, die spontan zu zucken begannen. Damit stand fest, dass die Zellen von Teratomen genauso wie diejenigen eines frühen Embryos pluripotent sind.

Schon damals verfolgte Evans die kühne Vision, solche Alleskönner genetisch zu verändern und sie dann in ein so genanntes Keimbläschen (eine Blastozyste) einzupflanzen. In diesem Frühstadium eines Embryos würden sie mitwachsen, sodass eine Chimäre herauskäme: ein Tier, dessen Gewebe ein Mosaik aus normalen und manipulierten Zellen ist. Durch herkömmliches Kreuzen sollten sich daraus dann »reinrassig« genmanipulierte Mäuse züchten lassen. Die pluripotenten Teratomzellen erwiesen sich freilich als ungeeignet für solche Experimente, da sie schnell erneut entarteten.

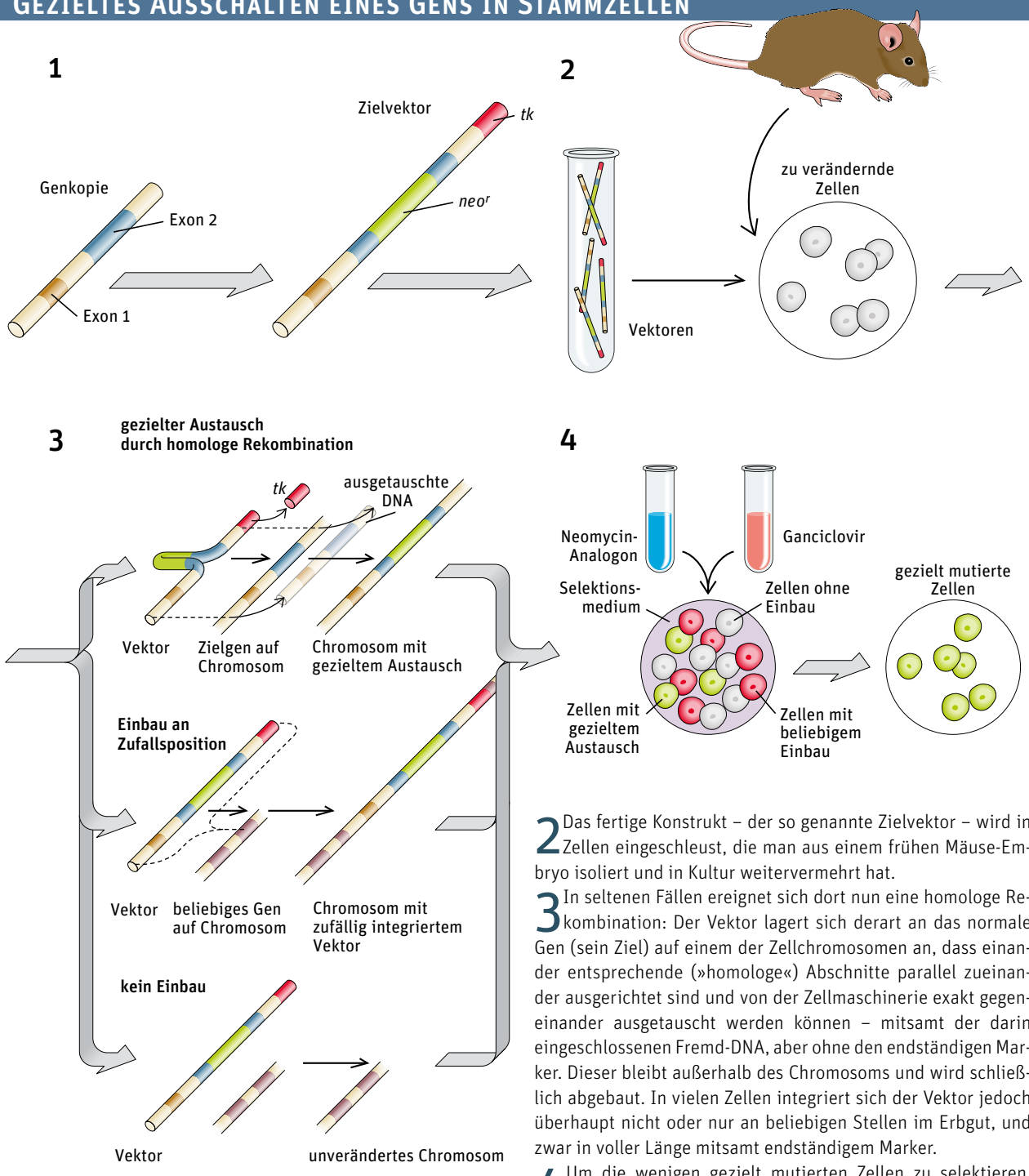
Als Alternative entwickelte Evans deshalb ein Verfahren, bei dem er geeignete Embryonalzellen auswählte und unter speziellen Bedingungen auf Agar in Petrischalen wachsen ließ. Durch geduldiges Probieren konnte er dabei jene Art von Zellkulturen etablieren, die man heute als embryonale Stammzellen bezeichnet. Mitte der 1980er Jahre erreichte Evans dann sein ursprüngliches Ziel: Mosaiktiere mit genmanipulierten Zellen zu erzeugen, die das veränderte Erbgut auch an die nachfolgenden Generationen weitergaben.

Die medizinische Anwendung bereits im Visier, schufen Evans und seine Mitarbeiter schließlich das erste Mausmodell einer menschlichen Krankheit (des Lesch-Nyhan-Syndroms), indem sie defekte Versionen des entsprechenden Gens in Stammzellen einschleusten, diese in Blastozysten einpflanzten und durch Kreuzung der resultierenden Chimären Mäuse erhielten, die in allen Zellen das defekte Gen trugen.

Gezielter Austausch von Genen

Für die Genmanipulation verwendete Evans allerdings ein recht grobes, unspezifisches Verfahren: Er führte das veränderte Gen mit einem Retrovirus in die embryonalen Stammzellen ein. Das hat gleich zwei Nachteile: Das ursprüngliche, normale Gen ist weiter vorhanden, und der Einbau der mutierten Form erfolgt weit gehend ungezielt an einer zufälligen Stelle, wo er möglicherweise einen Sekundärschaden verursacht. Eleganter wäre es, ganz gezielt das vorhandene Mäuse-Gen zu verändern. Das er-

Gezieltes Ausschalten eines Gens in Stammzellen



1 Um ein Gen auszuschalten, muss man zunächst Kopien davon im Reagenzglas mit einem Defekt versehen. Das lässt sich am einfachsten durch Einfügen eines Stücks Fremd-DNA in eine proteinkodierende Region (Exon) erreichen. Als störender Fremdkörper dient im dargestellten Fall das Gen *neo*^{r} (grün), das zugleich Resistenz gegen das Antibiotikum Neomycin verleiht. Anhand dieser Eigenschaft lassen sich später jene Zellen auslesen, bei denen sich das defekte Gen in die Chromosomen integriert hat. Hinzu kommt ein zweiter, diesmal endständiger Marker (rot): das Thymidinkinase-Gen *(tk)* des Herpes-Virus.

2 Das fertige Konstrukt – der so genannte Zielvektor – wird in Zellen eingeschleust, die man aus einem frühen Mäuse-Embryo isoliert und in Kultur weitervermehrt hat.

3 In seltenen Fällen ereignet sich dort nun eine homologe Rekombination: Der Vektor lagert sich derart an das normale Gen (sein Ziel) auf einem der Zellchromosomen an, dass einander entsprechende (»homologe«) Abschnitte parallel zueinander ausgerichtet sind und von der Zellmaschinerie exakt gegeneinander ausgetauscht werden können – mitsamt der darin eingeschlossenen Fremd-DNA, aber ohne den endständigen Marker. Dieser bleibt außerhalb des Chromosoms und wird schließlich abgebaut. In vielen Zellen integriert sich der Vektor jedoch überhaupt nicht oder nur an beliebigen Stellen im Erbgut, und zwar in voller Länge mitsamt endständigem Marker.

4 Um die wenigen gezielt mutierten Zellen zu selektieren, setzt man dem Kulturmedium zwei geeignete Substanzen hinzu – in diesem Fall das Neomycin-Analogon G418 und den Wirkstoff Ganciclovir. G418 läßt Zellen ohne funktionsfähiges *neo*^{r}-Gen absterben; das sind jene, die keine Vektor-DNA in ihr Erbgut aufgenommen haben (grau). Ganciclovir dagegen tötet alle Exemplare, die das *tk*-Gen tragen – also diejenigen, bei denen der Vektor an einer zufälligen Stelle eingefügt wurde (rot). Folglich überleben und vermehren sich praktisch nur noch Zellen mit dem gezielt eingebauten Vektor (grün). Sie enthalten an Stelle des gesunden ein inaktiviertes Gen auf dem veränderten Chromosom.

JARED SCHNEIDMAN DESIGN

möglichten die Forschungen der beiden anderen Preisträger.

Sowohl Capecchi als auch Smithies entwickelten Methoden zur Genmanipulation oder -reparatur durch homologe Rekombination; Ersterer berichtete darüber in dieser Zeitschrift (Spektrum der Wissenschaft 5/1994, S. 44). Unter Rekombination verstehen Biologen Vorgänge, bei denen DNA-Abschnitte neu zusammengesetzt werden. Bekanntestes Beispiel ist das Crossing-over zwischen Chromosomen, bei dem die elterliche DNA gemischt und so die genetische Vielfalt bei der Vererbung gesteigert wird. Und homolog heißt, dass die beiden auszutauschenden DNA-Abschnitte – bis auf das kleine Stück, das eingeschleust oder repariert werden soll – einander entsprechen.

Modellsysteme für Krankheiten

Capecchi fand heraus, dass normale Zellen in beliebigen Geweben auch dann Rekombination betreiben können, wenn sie sich nicht gerade teilen. Das bewies er mit einem einfachen Versuch: Er injizierte in Zellen mit einer defekten Version des Gens für die Resistenz gegen das Antibiotikum Neomycin einen DNA-Abschnitt mit dem intakten Gen und kultivierte sie dann in Gegenwart des Antibiotikums. Rund 0,1 Prozent von ihnen überlebten und vermehrten sich weiter: Sie hatten die intakte Version in ihr Erbgut aufgenommen.

Unabhängig von Capecchi erarbeitete um dieselbe Zeit auch Smithies Methoden zur Genreparatur durch homologe Rekombination. Beide erfuhren dann von Evans' Stammzellen und machten sich daran, sie für ihre eigenen Versuche heranzuziehen. Zunächst zeigten sie, dass sich auch bei diesen Zellen defekte Gene durch homologe Rekombination reparieren lassen. Dann entwickelten sie Strategien, die es erlauben, die erfolgreich genmanipulierten Exemplare unabhängig von der Art der Veränderung zu identifizieren, sodass man sie zuverlässig herausgreifen und in die Keimbläschen einsetzen kann (Kasten auf S. 21).

Damit war das Rezept zur Erzeugung von Knock-out-Mäusen komplett. Schon 1989 berichteten mehrere Arbeitsgruppen über seine erfolgreiche Anwendung.

Inzwischen gibt es Tausende verschiedener Zuchtstämme von Knock-out-Mäusen, von denen über 500 als Modellsysteme für menschliche Krankheiten dienen. Eines der ersten war das für Mukoviszidose, das Smithies und seine Mitarbeiter Anfang der 1990er Jahre etablierten. Diese Erbkrankheit eignete sich als Musterfall, weil sie von einer Störung in einem einzigen, schon länger bekannten Gen ausgelöst wird.

Meist liegen die Verhältnisse jedoch nicht so einfach. So sind bei Herz- und Kreislauferkrankungen, der Todesursache Nummer 1, mehrere Gene sowie zusätzlich Umweltfaktoren beteiligt sind. Tiermodelle für solche komplexen Konstellationen zu finden ist eine der großen Herausforderungen der aktuellen Medizin.

Mit neueren Varianten der Methode lässt sich der Knock-out heute auch zeitlich und räumlich einschränken. Dazu werden mit dem veränderten Gen zugleich Steuerelemente eingebaut, die es in bestimmten Organen oder Entwicklungsphasen oder unter gewissen experimentellen Bedingungen an- oder ausschalten.

Solche Verfahren für ein »bedingtes« Stilllegen haben große Bedeutung für die aktuellen Bemühungen, zu jedem Gen des inzwischen vollständig entzifferten Maus-Erbguts einen Knock-out-Stamm zu erzeugen. Dabei will man nicht nur neue Modellsysteme für menschliche Krankheiten finden, sondern anhand der Störungen oder Ausfälle, die das Abschalten eines Gens verursacht, dessen Funktion ermitteln. Schätzungen zufolge sind rund 15 Prozent der Mausgene für die Embryonalentwicklung unverzichtbar – von diesen kann man folglich nur mit dem bedingten Abschalten einen Knock-out-Stamm erhalten.

Neben der Medizin dient die Knock-out-Maus also auch der Grundlagenforschung und hilft uns, sowohl Mäuse als auch Menschen besser zu verstehen.

Michael Groß hat in Biochemie promoviert und ist Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

FRIEDENSNOBELPREIS

Eine grüne Entscheidung

Der Friedensnobelpreis ging an Al Gore und das IPCC, die beide jüngst Furore machten – der Politiker mit einem Film und das Klimagremium mit seinem neuesten Sachstandsbericht. Die weltweiten Bemühungen zum Klimaschutz erhalten dadurch weiter Auftrieb.

IPCC

Nach Ansicht des Nobelkomitees leisten der US-Politiker **Al Gore** (rechts) und der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimafragen (IPCC), hier sein Vorsitzender **Rajendra Pachauri** (links), mit ihrem Engagement für den Klimaschutz einen Beitrag zur Bewahrung des Friedens auf der Welt.

CARBON DISCLOSURE PROJECT (CDP-4)

Von Sven Titz

Damit hatten nicht viele gerechnet: Al Gore und das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) erhielten den Friedensnobelpreis 2007. Die Ehrung würdigt ihre Anstrengungen, das Wissen über den Klimawandel zu mehren und zu verbreiten und die Basis für die notwendigen Gegenmaßnahmen zu schaffen. Mit dem US-Politiker und dem Weltklimarat IPCC sind eine Person und eine Institution ausgezeichnet worden, die unterschiedlicher kaum sein könnten: auf der einen Seite der leidenschaftliche Advokat einer energischen Klimapolitik, auf der anderen eine Institution zur nüchternen wissenschaftlichen Beratung der Politik in Klimafragen.

Doch was, mag man fragen, hat das Erdklima mit dem Frieden zu tun? In

der Presseerklärung zum Nobelpreis gab das Komitee eine Antwort. Ein weitreichender Klimawandel, heißt es darin, werde die Lebensbedingungen eines großen Teils der Menschheit verändern und bedrohen. Dieser Wandel könne umfangreiche Wanderungsbewegungen auslösen und zu Auseinandersetzungen um die irdischen Ressourcen führen. Dadurch wachse zugleich das Risiko von Kriegen.

In diesem Jahr ist der Friedensnobelpreis also grün – wie schon vor drei Jahren, als die kenianische Umweltaktivistin Wangari Maathai ausgezeichnet wurde. Der grüne Trend lässt sich zum Teil verstehen, wenn man sich die Zusammensetzung des Komitees ansieht, das den Preis vergibt. Die Mitglieder werden nach Parteienproporz vom »Storting« ausgewählt, dem norwegischen Parlament. In dem skandinavischen Land ist die Sorge um die Naturzerstörung groß. Eine gewisse Zuneigung zu Umweltforschern und -aktivisten ist da nicht verwunderlich.

Der 1948 geborene Albert Arnold Gore war von 1993 bis 2001 Vizepräsident der USA unter Bill Clinton. Vor sieben Jahren verlor er die Wahl zum Präsidenten – trotz nomineller Stimmenmehrheit – knapp gegen seinen republikanischen Kontrahenten George W. Bush. Seitdem hat er sich mit großem Eifer auf das Problem der globalen Erwärmung gestürzt und in aller Welt Vorträge über das Thema gehalten.

Gore und seine Powerpoint-Präsentationen wurden in dem Film »Eine unbequeme Wahrheit« porträtiert. Der sehr erfolgreiche und eindringliche Streifen erhielt trotz einiger agitatorischer Übertreibungen zwei Oscars: einen als bester Dokumentarfilm und einen für den besten Originalsong.

Man sagt Gore einen Hang zum Visionären nach. So trug er als Senator Anfang der 1990er Jahre durch eine Gesetzgebungsinitiative dazu bei, dass sich das Internet in den USA rasch entwickeln konnte. Heute sitzt er im Aufsichtsrat von Apple und berät Google – was sein Faible für Kommunikationstechnologien belegt.

Hightech nutzt Gore auch bei seinen Vorträgen über den Klimawandel. Sie stützen sich weit gehend auf Ergebnisse, die das IPCC zusammengetragen hat – jenes internationale Gremium mit Sitz in Genf, das 1988 von der Weltmeteorologieorganisation und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen ins Leben gerufen wurde. Seine Aufgabe besteht darin, ein Wissensfundament für Politiker bereitzustellen, die sich mit der globalen Erwärmung auseinandersetzen.

Wer sich in die Arbeitsweise des Gremiums vertieft, dem geht es ein wenig so wie dem Leser von Kafkas Roman »Das Schloss« – die Einzelheiten sind klar, doch das Ganze macht einen etwas verwirrenden Eindruck.

Komplizierte Entstehung der Klimaberichte

Einmal im Jahr treffen sich Vertreter von Regierungen, Behörden und Forschungsinstitutionen der IPCC-Mitgliedsländer zu Plenarsitzungen. Auf diesen Tagungen werden unter anderem die Berichte über das Weltklima vorbereitet, die alle fünf bis sechs Jahre für so viel Wirbel sorgen.

Die Prozedur zur Auswahl der Autoren ist eine Wissenschaft für sich. Zuerst einmal dürfen die Regierungen und Organisationen, die zum Weltklimarat gehören, Vorschläge machen. Die drei Arbeitsgruppen des IPCC treffen daraus ihre Wahl. Dabei achten sie neben der Expertise der Kandidaten auch auf die Vielfalt der Meinungen und der geografischen Herkunft.

Am letzten Klimabericht haben mehr als 1250 Autoren mitgearbeitet, darunter neben Klimaforschern auch Wirtschaftswissenschaftler und Politologen. Die Arbeitsgruppe I befasst sich mit den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels. In der Arbeitsgruppe II wird diskutiert, wie verwundbar die Zivilisation gegenüber den Änderungen ist und wie sie sich an den Wandel anpassen kann. Strategien zur Vermeidung des Klimawandels sind Sache der Arbeitsgruppe III.

Die Autoren der jeweiligen Berichte durchforsten Tausende von Studien in begutachteten Fachzeitschriften, gewichten die Resultate und fassen sie zusammen. Anschließend steht eine doppelte Prüfung auf dem Programm: Externe Gutachter nehmen den Report unter die Lupe. Anhand ihrer Kommentare wird er überarbeitet. Dies geschieht ein weiteres Mal, bevor das Werk – den Arbeitsgruppen entsprechend – in drei Teilen in Druck geht. In einem vierten Band werden die Ergebnisse zu einem »Synthesis Report« kondensiert.

Für Politiker, die niemals die mehr als 3000 Seiten trockener Wissenschaftsprosa des kompletten Berichts lesen und verstehen könnten, gibt es einen besonderen Service: Sie erhalten eine Zusammenfassung der Erkenntnisse jedes Teilreports auf wenigen Seiten. Bei dieser »Summary for Policymakers« dürfen Regierungsvertreter aller am IPCC beteiligten Länder mitreden. In langwierigen Verhandlungen ringen die Wissenschaftler mit ihnen um einzelne Formulierungen. Als jüngst die »Summary« der Arbeitsgruppe I verhandelt wurde, forderten vor allem China und Saudi-Arabien einige Relativierungen, während europäische Delegationen – besonders die deutsche – für schärfere Aussagen eintraten, wie inzwischen durchgesickert ist.

Das IPCC hat neben vielen kleineren Reports bisher vier Weltklimaberichte verfasst: 1990, 1995, 2001 und 2007. Der letzte hat der Diskussion über klimapolitische Maßnahmen jetzt neuen Schwung verliehen. Das Kioto-Protokoll von 1997 läuft in fünf Jahren aus – auf der UN-Klimakonferenz in Bali im Dezember wird sich entscheiden, ob es ein Nachfolge-Abkommen gibt.

In dieser klimapolitischen Zwangslage ist die Vergabe des Friedensnobelpreises an Gore und das IPCC weit gehend begrüßt worden. Die Beiträge der Preisträger zur Vermeidung des Klimawandels hätten das Bewusstsein in der ganzen Welt geschärft, sagte etwa José Manuel Barroso, der Präsident der EU-Kommission. Laut Achim Steiner, dem Leiter des UN-Umweltprogramms, hat die Entscheidung deutlich gemacht, dass die Bekämpfung des Klimawandels »eine zentrale friedens- und sicherheitspolitische Aufgabe für das 21. Jahrhundert ist«.

Untätigkeit als Vizepräsident

Viele Beobachter werten die Preisvergabe an Gore auch als Signal gegen die Umweltpolitik des US-Präsidenten. Parteigänger von Bush sind über die Auszeichnung seines ehemaligen Kontrahenten natürlich verärgert.

Kritik kam aber sogar aus Kreisen von Umweltschützern. Der Vorsitzende der Umweltorganisation »Rettet den Regenwald« Reinhard Behrend warf Gore vor, durch sein Engagement für Biokraftstoffe Konflikte in Entwicklungsländern mit herbeizuführen. Die Nutzung von Agrarenergie habe zerstörerische Folgen für die Wälder, die Artenvielfalt und für die Welternährung.

Andere Kritiker sehen einen befremdlichen Widerspruch zwischen dem heutigen verbalen Werben Gores für den Klimaschutz und seiner Untätigkeit als Vizepräsident, als er eine US-Politik mitverantwortete, die völlig konträr zu jetzigen Zielen war.

Die Preisvergabe an das IPCC polarisiert die Öffentlichkeit weit weniger – die Entscheidung erhielt noch größere Zustimmung als die für Gore. Allgemein wird die ausdauernde Arbeit der Spezialisten gewürdigt, ohne die eine Diskussion über klimapolitische Maßnahmen gar nicht stattfinden würde.

Kritische Reaktionen gab es nur wenige. Die Auszeichnung werde die Klimaforschung weiter politisieren und die Glaubwürdigkeit der Wissenschaft untergraben, prophezeite in einem Kommentar in der »Neuen Zürcher Zeitung« der Physiker und Redakteur Andreas Hirstein. Die IPCC-Experten müssten als Sachverständige neutral sein »und nicht vom Motiv beseelt, die Klimakatastrophe zu verhindern«.

Ob die Preisträger mit der Ehrung und ihrem dadurch gestärkten Ansehen klug umgehen werden – darauf hat das Nobelkomitee in Oslo allerdings keinen Einfluss. Was sie aus der Ehrung machen, müssen Gore und die Wissenschaftler des IPCC schon selbst entscheiden.

Sven Titz ist promovierter Meteorologe und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Berlin.

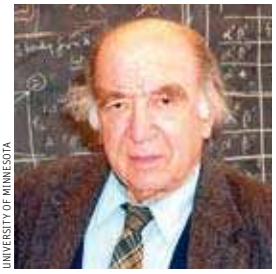
BEIDE ABBILDUNGEN: 2007 PARAMOUNT PICTURES. ALL RIGHTS RESERVED

Der Film »Eine unbequeme Wahrheit« (rechts), der auf den weltweiten Powerpoint-Präsentationen von Al Gore (links) beruht, sensibilisierte vor allem die US-Bevölkerung für Klimafragen.

NOBELPREIS FÜR WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN

Salomonische Urteile auf mechanischem Weg

Der Preis der Schwedischen Reichsbank für Wirtschaftswissenschaften im Gedenken an Alfred Nobel geht in diesem Jahr an die drei Amerikaner Leonid Hurwicz, Eric Maskin und Roger Myerson für ihre Beiträge zur so genannten Theorie der Mechanismen.


UNIVERSITY OF MINNESOTA

LLOYD DEGRANE, UNIVERSITY OF CHICAGO

CLIFF MOORE, INSTITUTE FOR ADVANCED STUDIES

Wie sollte ein Staatswesen die Interaktionsregeln für seine Angehörigen setzen, damit deren eigennütziges Handeln zum allgemeinen Wohl ausschlägt? **Leonid Hurwicz** (links) von der Universität von Minnesota in Minneapolis hat eine allgemein gültige Theorie für diese Regeln (»Mechanismen«) aufgestellt, **Roger Myerson** (Mitte) von der Universität Chicago (Illinois) ihre Vielzahl auf eine gut erforschbare Teilmenge reduziert und **Eric Maskin** (rechts) vom Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) geeignete Verfahren zur Konstruktion von Mechanismen mit erwünschen Eigenschaften gefunden.

Von Christoph Pöppe

Zwei Frauen beanspruchen ein und dasselbe Kind als ihr eigenes. Als der Fall vor König Salomo kommt und dieser keinen Anhaltspunkt für eine Entscheidung findet, bestimmt er, das Kind sei mit dem Schwert zweizuteilen und jeder der Streitenden eine Hälfte zu übergeben – woraufhin eine der Frauen ihren Anspruch zurückzieht. Indem sie das Leben des Kindes höher bewertet als ihren Besitzanspruch, gibt sie sich als die wahre Mutter zu erkennen und bekommt das Kind zugesprochen.

Das Verfahren ist zweifellos genial: Es extrahiert aus den Aussagen der Beteiligten, die nichts als ihre eigenen Ziele anstreben, die reine Wahrheit (gehen wir davon aus, dass das Überleben des eigenen Kindes zu den ureigenen Zielen einer Mutter gehört). Der weise Herrscher erreicht dieses Kunststück, indem er kraft königlicher Gewalt die Bedingungen derart setzt, dass es für jeden Beteiligten vorteilhaft ist, die Wahrheit zu sagen (wenn auch in diesem Fall in sehr verschleierter Form).

Damit wäre Salomo fast ein Kandidat für den diesjährigen Wirtschafts-Nobelpreis gewesen – wenn seinem Verfahren nicht die wissenschaftliche Reproduzierbarkeit gefehlt hätte. Der nächste gleichartige Fall vor seinem Thron, diesmal mit vorinformierten Müttern, die einander in theatralischen Verzichtgesten überbieten, wäre sicher nicht mehr so elegant zu lösen gewesen.

Ein ökonomisches Zentralbüro?

Aus diesem Grund verlangen Wirtschaftswissenschaftler statt der trickreichen Lösung eines Einzelfalls ein allgemeines Verfahren und nennen es einen »Mechanismus«. Wer mit diesem Wort »schematisch« und »fantasielos« assoziiert, liegt genau richtig. Man darf an ein Computerprogramm denken, das die Voten aller Beteiligten entgegennimmt und daraus nach einem offen einsehbaren Algorithmus ein für alle verbindliches Ergebnis errechnet. Während die Beteiligten, wie in der ökonomischen Theorie üblich, nichts als die Maximierung ihres eigenen Nutzens im Sinn haben, verfolgt der Mechanismus ein höheres Ziel wie Wahrheitsfindung, Gerechtigkeit oder – bei wirtschaftlichen Transaktionen – Markteffizienz; darunter versteht man, dass ein Handel, der für alle Beteiligten profitabel ist, auch wirklich zu Stande kommt.

Das Konzept vom Mechanismus hat der Preisträger Leonid Hurwicz in den 1950er und 1960er Jahren zu einer mathematischen Theorie ausgearbeitet. Für den 1917 in Moskau geborenen Sohn polnisch-jüdischer Eltern, der mitsamt seiner Familie sowohl von den Bolschewiken als auch von den Nazis durch Europa gejagt wurde, bis er 1940 in die USA emigrieren konnte, ist die Vorstellung von einem ökonomischen Zentralbüro, das die Meldungen der Wirtschaftssubjekte entgegennimmt und daraus alle wesentlichen Entscheidungen errechnet, nicht ohne Pikanterie. Damit der Mechanismus besser funktioniert als die sozialistische Planwirtschaft, muss er allerdings »anreizkompatibel« *(incentive compatible)* sein, das heißt den Wirtschaftssubjekten einen Anreiz bieten, die Wahrheit zu sagen.

Tatsächlich erweist sich die Fiktion vom ökonomischen Zentralbüro als äußerst nützlich. Das mathematische Konzept vom Mechanismus ist zwar wesentlich allgemeiner, indem es auch Märkte umfasst, auf denen die Kommunikation ungeregelt und dezentral abläuft. Es genügt jedoch, aus dieser unübersichtlichen Vielfalt eine kleine, theoretisch besser zugängliche Unterklasse zu betrachten. Diese »direkten Mechanismen« beruhen ausschließlich auf Nachrichten, welche die Beteiligten an das Zentralbüro senden, während zwischen ihnen keine Kommunikation stattfindet.

Börsenprogramme, die aus einer Menge vorliegender Kauf- und Verkaufsaufträge einen Gleichgewichtspreis bestimmen und auf diese Transaktionen anwenden, kommen dem theoretischen Modell des direkten Mechanismus ziemlich nahe. Gleiches gilt für das Programm des Online-Auktionshauses eBay mitsamt dem Bietagenten.

In der Wirtschaftswelt insgesamt sind direkte Mechanismen dagegen selten; in der Regel lässt sich aber ein Ersatz finden, der ohne ein Zentralbüro auskommt und trotzdem im Wesentlichen

Bei einem Handel gewinnen beide Partner. In diesem Beispiel hat der Verkäufer für ein Anfängerlehrbuch keine Verwendung mehr und misst ihm daher weniger Wert bei als der Käufer, der es dringend benötigt. Anders als im hier gezeigten einfachen Fall kann das Geschäft jedoch scheitern, weil die beiden Partner jeweils einen unrealistisch hohen Gewinn machen wollen. Die diesjährigen Wirtschaftsnobelpreisträger haben Mechanismen untersucht, die ein solches Marktversagen verhindern können.

dasselbe leistet. Der Preisträger Roger Myerson, geboren 1951 in Boston und Ökonomie-Professor in Chicago, hat dieses so genannte Offenlegungsprinzip *(revelation principle)* in voller Allgemeinheit ausgearbeitet und auf Gebiete wie Auktionen und die Preiskontrolle unter einem Monopol angewandt.

Die Theorie des Entwurfs von Mechanismen *(mechanism design theory)* ist so abstrakt, dass in ihren formalen Rahmen nicht nur klassische Allokationsprobleme passen – welchem unter mehreren Interessenten ist ein Produktionsmittel oder eben ein Baby zuzuweisen? –, sondern auch die Suche nach einem gerechten Wahlsystem. So ist die Bestimmung eines Wahlsiegers aus dem Ergebnis einer Abstimmung nichts weiter als ein Mechanismus im Sinne der Theorie. Nur ist dieser leider nicht immer anreizkompatibel. In manchen Situationen liegt es im Interesse eines Wählers, gegen seine eigene Überzeugung zu stimmen, damit zum Beispiel der gefährlichste Konkurrent seines eigentlichen Favoriten im ersten Wahlgang ausscheidet.

Kenneth Arrow, mit dem Hurwicz in den 1950er Jahren zusammenarbeitete, ist für den Beweis berühmt geworden, dass praktisch kein Wahlsystem von derartigen Anreizen zur Unwahrheit frei sein kann (Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 74). Ironie der Geschichte: Als Arrow 1972 den Wirtschaftsnobelpreis bekam, war er mit 51 Jahren der jüngste Laureat überhaupt. Der etwas ältere Hurwicz musste 35 Jahre länger auf die Auszeichnung warten und ist nun mit 90 Jahren der älteste Mensch, der jemals den Nobelpreis erhielt. Vor sieben Jahren war seinem Schüler Daniel McFadden diese zweifelhafte Ehre zuteil geworden (Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 20).

In der Wirtschaft selbst sind die Ergebnisse zunächst ebenso entmutigend. Adam Smith (1723–1790), der Klassiker der Nationalökonomie, nannte den von ihm beschriebenen Mechanismus des Marktes die »unsichtbare Hand«, weil er auf wundersame Weise den Eigennutz jedes Einzelnen in ein Wohlergehen für alle verwandelt. Vom Standpunkt der Mechanismentheorie jedoch erscheint die klassische Marktsituation, in der Verkäufer und Käufer so lange verschiedene Angebote in den Raum werfen, bis ein Geschäft zu Stande kommt (die *double auction*, siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 60), eher als ein glücklicher Sonderfall.

Betrug darf sich nicht lohnen

Normalerweise hat ein Akteur des Wirtschaftsgeschehens allen Grund, seine Präferenzen falsch darzustellen. Ein Standardbeispiel ist ein Brückenbauprojekt, für das viele Parteien zusammen das Geld aufbringen müssen. Für jede einzelne unter ihnen ist es einerseits rational, so viel beizutragen, wie sie selbst – durch eingesparte Wegezeit – von dem Projekt profitiert, andererseits diesen Nutzen geringer zu deklarieren, als er in Wirklichkeit ist, um weniger zahlen zu müssen. Wenn alle so handeln, wird auch eine wirtschaftlich sinnvolle Brücke mangels Finanzierung nicht gebaut.

Ein anderes Beispiel ist der Handel zwischen zwei Leuten, die füreinander der einzige denkbare Käufer beziehungsweise Verkäufer sind. Wenn mir ein Gut zehn Euro wert ist und seinem bisherigen Besitzer zwei Euro, dann können wir beide gewinnen, indem er mir das Gut zu irgendeinem Preis dazwischen verkauft (Bild). Jeder von uns möchte aber von der potenziellen Wertschöpfung, das heißt der Differenz zwischen der eigenen internen Bewertung und derjenigen des Gegenübers, möglichst viel in die eigene Tasche stecken. Das erreiche ich, indem ich weniger biete, als ich zu zahlen bereit bin, und er mehr fordert, als er eigentlich haben möchte. Daran kann im Endeffekt das Geschäft scheitern, einerlei ob wir konventionell oder über ein vertrauenswürdiges Zentralbüro miteinander verhandeln.

Für das Brückenbauprojekt gibt es zwar einen Mechanismus, welcher der Ehrlichkeit und damit der Effizienz aufhilft. Das Verfahren von William Vickrey, Edward Clarke und Theodore Groves arbeitet nach dem Vorbild der Zweitpreisauktion, bei welcher der siegreiche Bieter nicht sein eigenes (höchstes) Gebot, sondern das zweithöchste bezahlt. Damit kann er offen bekennen, was ihm die zu ersteigernde Ware wert ist, ohne dadurch jeden Anteil an der Wertschöpfung preiszugeben. Entsprechend gibt beim Brückenbau jeder an, was ihm das Projekt – angeblich – wert ist, bezahlt aber im Erfolgsfall nicht diesen Betrag, sondern die Kosten des Projekts minus der Summe der Ansagen aller anderen.

Dieser Mechanismus nimmt den Beteiligten den Anreiz zur Unehrlichkeit; allerdings ist die Summe der Zahlbeträge im Allgemeinen nicht mehr gleich den Projektkosten – eine Diskrepanz, die in einem weiteren Schritt in anreizkompatibler Weise ausgeglichen werden muss.

Im Allgemeinen findet man jedoch auf der Suche nach dem idealen Mechanismus nur Unmöglichkeitsresultate. Gegeben sei die mathematische Ausdrucksform eines Ziels wie Gerechtigkeit oder Markteffizienz. Gesucht ist ein Mechanismus, der garantiert, dass die Optima dieser »Zielfunktion« genau den Verhaltensweisen entsprechen, die jeder Beteiligte für sich selbst unter allen Umständen

für optimal hält. Aus einer Argumentation analog der von Kenneth Arrow folgt, dass es einen solchen Mechanismus nicht geben kann.

Natürlich motiviert ein derartiges Ergebnis zur Suche nach zweitbesten Lösungen. Wenn sich nicht gewährleisten lässt, dass das sozial erwünschte Verhalten für den einzelnen Akteur unter allen Umständen vorteilhaft ist, mildert man diese Bedingung und fordert zum Beispiel nur noch, dass das »richtige« Verhalten wenigstens dann vorteilhaft sein soll, wenn alle anderen es auch praktizieren. Mit anderen Worten: In einer Welt von Tugendhaften darf eine individuelle Abweichung vom Pfad der Tugend dem Abweichler nichts einbringen. In der Sprache der Spieltheorie nennt man diese Situation ein Nash-Gleichgewicht.

Der einfachste Mechanismus dieser Art ist unter dem Namen »Gefangenendilemma« bekannt (Spektrum der Wissenschaft 8/2007, S. 82). Allerdings muss man sich anders als üblich in die Position des Staatsanwalts versetzen. Das sozial erwünschte Verhalten ist ja gerade, dass zwei Verbrecher, die verhaftet wurden und einzeln verhört werden, eben nicht kooperieren, sondern einander verpfeifen. Also konstruiert der Staatsanwalt den Mechanismus so, dass derjenige, der als Einziger von dem erwünschten Verhalten abweicht, den größten Nachteil erleidet.

Meist gibt es allerdings viele Nash-Gleichgewichte, darunter auch sehr untugendhafte. Zudem ist zu berücksichtigen, dass in der Realität die Marktteilnehmer einander nicht besonders gut kennen. Wegen dieser allgemeinen Unsicherheit kann der Einzelne auch nicht den Vorteil genau beziffern, den ihm tugendhaftes Verhalten einbringt, sondern nur dessen Erwartungswert. Paradoxerweise macht die Konstruktion von Mechanismen das allerdings tendenziell einfacher.

Die Kunst besteht darin, den Mechanismus zu erreichen, dass jedes Nash-Gleichgewicht ein Optimum der Zielfunktion ist. Wenn das gelingt, hat im Sprachgebrauch der Ökonomen der Mechanismus die Zielfunktion »implementiert«. Bahnbrechende Beiträge zur Theorie der Implementation stammen vom Dritten im Bunde der Preisträger, Eric Maskin vom Institute for Advanced Study in Princeton.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Springers Einwürfe

Wirtschaftstheorie im Affenkäfig

Der Schimpanse als *Homo oeconomicus*

Als in der Schule die menschliche Anatomie drankam, stellte der Naturkundelehrer unter allgemeinem Gekicher ein Skelett neben die Tafel. Solche zähnefletschenden Gerippe kannten wir aus der Geisterbahn, doch jetzt sollten wir uns nicht gruseln, sondern lernen, wie die Knochen uns beim Gehen, Stehen und Greifen unterstützen.

Ein ähnlich nützliches, wenn auch bis zur Unkenntlichkeit abgespecktes Gespenst ist der *Homo oeconomicus* in der Wirtschaftstheorie. Als rationaler Nutzenmaximierer bildet er quasi das Rückgrat der Marktanalyse. Zwischen Angebot und Nachfrage stur auf den eigenen Vorteil bedacht, garantiert er gemäß der klassisch reinen Lehre die optimale Verteilung von Gütern und Dienstleistungen.

In den letzten Jahren wurden allerdings mehrere Wirtschaftsnobelpreise für Theorien verliehen, die das knöcherne Modell mit etwas mehr Leben füllen (siehe nebenstehenden Bericht). Denn der wirkliche Mensch ist zwar kaum je so selbstlos wie sein moralisches Idealbild, aber auch nie so grenzenlos eigennützig wie der klassische *Homo oeconomicus*. Selbst wenn im berühmt gewordenen Ultimatumspiel ein Anbieter die Macht hat, beliebig wenig von seinem Besitz herzugeben, behält er nicht fast alles für sich, sondern überlässt seinem Gegenüber einen respektablen Anteil – sonst weist dieser das mickrige Angebot empört zurück, und nach den Spielregeln gehen alle beide leer aus. Das Gebot der Fairness wirkt offenbar in allen Kulturen und sozialen Schichten; es erweist sich als anthropologische Konstante.

Ist damit der klassische Wirtschaftsegoist gleich einem anatomischen Skelett zum bloßen Schattendasein im ökonomischen Lehrmittelkabinett verurteilt? Keineswegs: Soeben wurden lebende Exemplare entdeckt – freilich im Affenkäfig. Primatenforscher um Michael Tomasello vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig erprobten an Schimpansen eine affengerechte Version des Ultimatumspiels, und siehe da, im Unterschied zum Sozialwesen Mensch verhielten sich die Tiere als knallharte Nutzenmaximierer *(Science, Bd. 318, S. 107)*.

Als aufzuteilender Besitz dienten mehrere Schälchen mit abgezählten Rosinen. Ein Versuchstier bekam die Rolle des Anbieters und konnte einem zweiten Tier entweder einen großzügigen Anteil zuschanzen oder eine extrem unfaire Aufteilung vornehmen. Wie sich zeigte, bevorzugte nicht nur der Anbieter stets die höchst ungleiche, für ihn günstigere Teilung, sondern sein tierischer Versuchspartner akzeptierte jede noch so kümmerliche Rosinenspende, statt sie zurückzuweisen und damit den Versuchsleiter zu veranlassen, alle Rosinen aus dem Verkehr zu ziehen.

Somit verhielten sich beide Schimpansen als rationale Maximierer gemäß der klassischen Wirtschaftslehre: Der Anbieter bekam fast alles, der Empfänger wenigstens etwas. Auf die Weise hatten beide mehr davon, als wenn der Empfänger den unfairen Handel hätte platzen lassen. Mit einem Wort: Die Ökonomen beschreiben mit ihrem Modell des *Homo oeconomicus* in Wahrheit nicht etwa den Menschen, sondern seinen Cousin: den Affen.

Das bringt mich auf eine Idee: Könnte man im Lichte dieses Wissens nicht idealisiertes Marktgeschehen am Tiermodell erforschen? Ich stelle mir ein Börsenparkett vor, auf dem mehrere Schimpansen eifrig mit Rosinen handeln. Der Versuchsleiter kann je nachdem, wie er die Schalen füllt, dafür sorgen, dass alle etwas bekommen – oder dass ein Affe am Ende mehr Rosinen hat, als er fressen kann, und die anderen gar nichts mehr. So ließe sich das Entstehen von Marktmonopolen, Spekulationsblasen und Börsencrashs simulieren. Und der Anschein, die Börse gleiche oft einem Affenzirkus, bekäme endlich ein wissenschaftliches Fundament.

Michael Springer

SERIE Raumfahrt – Die kommenden Jahrzehnte
Teil I: 5 Ziele für die Raumfahrt
Teil II: Der nächste Flug zum Mond
Die Suche nach der großen Unbekannten
Dieser Teil unserer Kurzserie stellt das US-Mondprogramm sowie Weltraummissionen vor, die sich ganz der Suche nach der Dunklen Energie widmen. In Teil 1 berichteten wir über Pläne zur Erforschung des Sonnensystems.

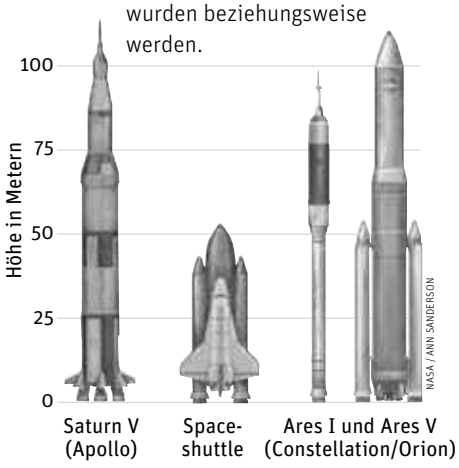
Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

DER NÄCHSTE FLUG ZUM MOND

2020 kehrt die Menschheit zum Mond zurück – dieses Mal nicht nur für einen kurzen Besuch. Der Apollo-Nachfolger Orion ermöglicht vier Astronauten, gleich ein halbes Jahr lang vor Ort zu bleiben.

Von Charles Dingell, William A. Johns und Julie Kramer White

Der Himmel ist tintenschwarz. Doch plötzlich erhebt sich die leuchtende Mondscheibe über der Sichel des irdischen Horizonts. Die Astronauten in der Orion-Kapsel sahen zwar schon viele dieser spektakulären Mondaufgänge, während ihr Raumschiff in den vergangenen drei Tagen 300 Kilometer über unserem Heimatplaneten schwebte. Dieser Moment aber ist ein besonderer, denn jetzt beschleunigt der Pilot das Schiff mit einem perfekt abgestimmten Schub der Raketen endlich in Richtung auf sein Ziel. »Translunar injection burn in 10 seconds …«, meldet der Funkspruch von der Erde, »… five, four, three, two, one …« Zündung! Weiß glühende Flammen schießen aus den Raketendüsen am Heck, das Raumschiff schüttelt sich kraftvoll: Die Besatzung beginnt ihre Reise zu unserem nächsten Nachbarn im All.



Startsysteme für bemannte Missionen, wie sie von der Nasa seit den späten 1960er Jahren entwickelt wurden beziehungsweise werden.

Wir schreiben das Jahr 2020. Noch immer ist der Erdmond ein geheimnisvoller Ort – und fast ein halbes Jahrhundert lang hat ihn kein Mensch mehr betreten. Nun aber kehren die Amerikaner zum Mond zurück. Und wollen dort bleiben. Dieses Mal soll ein Außenposten errichtet werden, der einer neuen Generation von Raumfahrern als dauerhafte Expeditionsbasis dienen soll.

Das Orion-Raumschiff ist die zentrale Komponente des Constellation-Programms der US-Weltraumbehörde Nasa. Ziel der ehrgeizigen Multi-Milliarden-Dollar-Anstrengung ist die Entwicklung eines Transportsystems für den Weltraum. Im Rahmen des Programms sollen nicht nur Astronauten zum Mond und wieder zurück befördert, sondern auch die Internationale Raumstation ISS versorgt und irgendwann sogar Menschen zum Mars gebracht werden. Seit es Mitte 2006 ins Leben gerufen wurde, arbeiten Ingenieure und Forscher der Nasa sowie ihre Kollegen vom US-Luft- und Raumfahrtkonzern Lock-

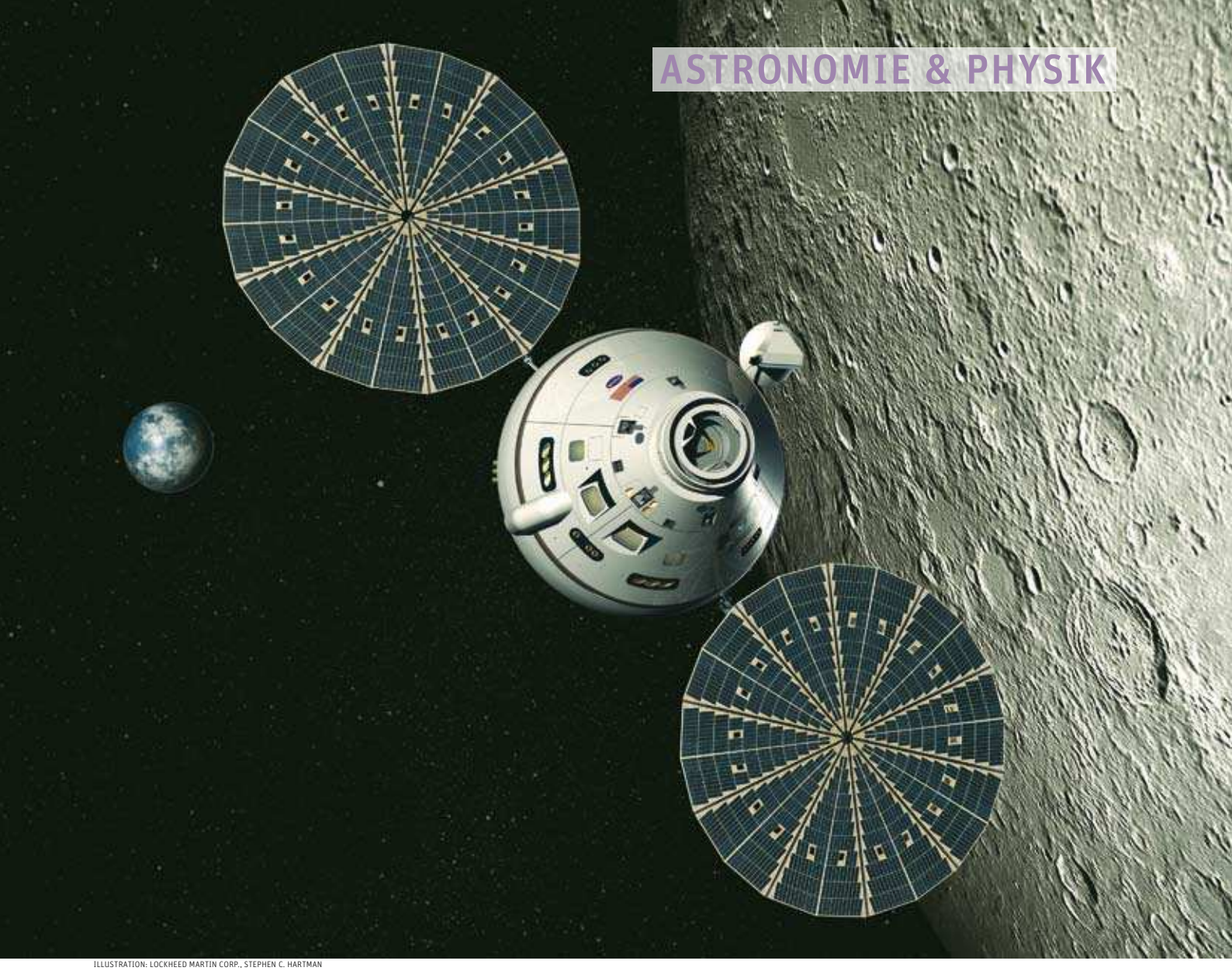


ILLUSTRATION: LOCKHEED MARTIN CORP., STEPHEN C. HARTMAN

Große Solarpaddel sammeln Energie, während das Nasa-Raumschiff Orion den Mond umkreist (Fotomontage). Bis zu 210 Tage kann es hier unbemannt warten, während seine Besatzung den Erdtrabanten erforscht.

heed Martin daran, Antriebsstufen, Mannschafts- und Servicemodule sowie Landesysteme zu entwickeln. Denn auch nach 2010, wenn die Spaceshuttle-Flotte eingemottet wird, wollen die USA weiter in der Lage sein, bemannte Missionen durchzuführen.

Vor allem robust und bezahlbar soll die neue Technik sein. Um Entwicklungsrisiken und -kosten zu minimieren, greifen die Nasa-Planer auf viele bewährte technische Ideen des Apollo-Programms zurück. Schon das war eine Meisterleistung der Ingenieurskunst gewesen. Von 1969 bis 1972 hatte es 18 Menschen im Rahmen von sechs Missionen sicher zum Mond gebracht. Zwölf von ihnen betraten den Trabanten, sechs blieben auf Warteposition in einer Umlaufbahn. (Eine weitere Mission, die pannengeplagte Apollo 13, umrundete den Mond nur.) Nun überarbeiten die Ingenieure viele der Systeme und Komponenten und stellen sie um auf modernste Technologie. Das Ergebnis, so Nasa-Chef Michael Griffin, sei »Apollo on steroids« – im Kern also das alte Vehikel, aber runderneuert und auf Hochleistung getrimmt.

Die Mannschaftskapsel beispielsweise ist von außen fast dieselbe, doch unmittelbar unter der Hülle endet die Ähnlichkeit. Die Orion kann eine größere Mannschaft beherbergen: Bei Flügen zum Mond sollen sich vier Raumfahrer die etwa 20 Kubikmeter große Druckkabine teilen. Bei den schon ab 2015 geplanten Flügen zur ISS sind es sogar sechs. In den Apollo-Kapseln hingegen zwängten sich drei Astronauten (plus Ausrüstung) in gerade einmal zehn Kubikmetern zusammen.

Auch kann die Orion vieles, was Apollo noch nicht konnte. Neue strukturelle Komponenten sowie Computer- und Kommunikationstechnologie versetzen sie zum Beispiel in die Lage, vollautomatisch an andere Raumschiffe anzudocken. Zudem kann das neue Raumschiff sechs Monate lang in der Mondumlaufbahn parken – unbemannt. Sicherer ist sie obendrein: Zum Beispiel können bei einer Notfallsituation während des Starts kräftige

FLUG MIT RISIKEN

- 18 Astronauten kamen bislang bei bemannten Missionen ums Leben.
- 1967 zerschellte die mit einem Mann besetzte Sojus 1 bei der Landung. 1971 erstickten drei Kosmonauten in der Sojus 11. 1986 zerbrach der Spaceshuttle Challenger kurz nach dem Start, sieben Menschen kamen ums Leben. Ebenso viele Astronauten starben 2003 bei der Rückkehr des Shuttles Columbia.
- 1967 zerbrach ein US-Raketenflugzeug beim Wiedereintritt in die Atmosphäre, der Pilot starb.

Fluchtraketen die Mannschaft aus der Gefahrenzone bringen.

Der Start steht unmittelbar bevor. 110 Meter hoch ragt die zweistufige Ares V über den Salzmarschen auf dem Gelände des Kennedy-Raumflugzentrums in den Himmel. Die Frachtrakete, die fünf starke Raketenmotoren antreiben, wird noch vor den Astronauten ins All fliegen und ist fast so groß wie die legendäre Saturn V der Apollo-Ära. Der Haupttank der Ares V ist eine Weiterentwicklung des externen Shuttle-Tanks und liefert den RS-68-Triebwerken ein flüssiges Sauerstoff-Wasserstoff-Gemisch. Die Triebwerke wiederum sind eine Variante der in der Delta-IV-Rakete eingesetzten Exemplare, die derzeit bei militärischen und kommerziellen Starts zum Einsatz kommen.

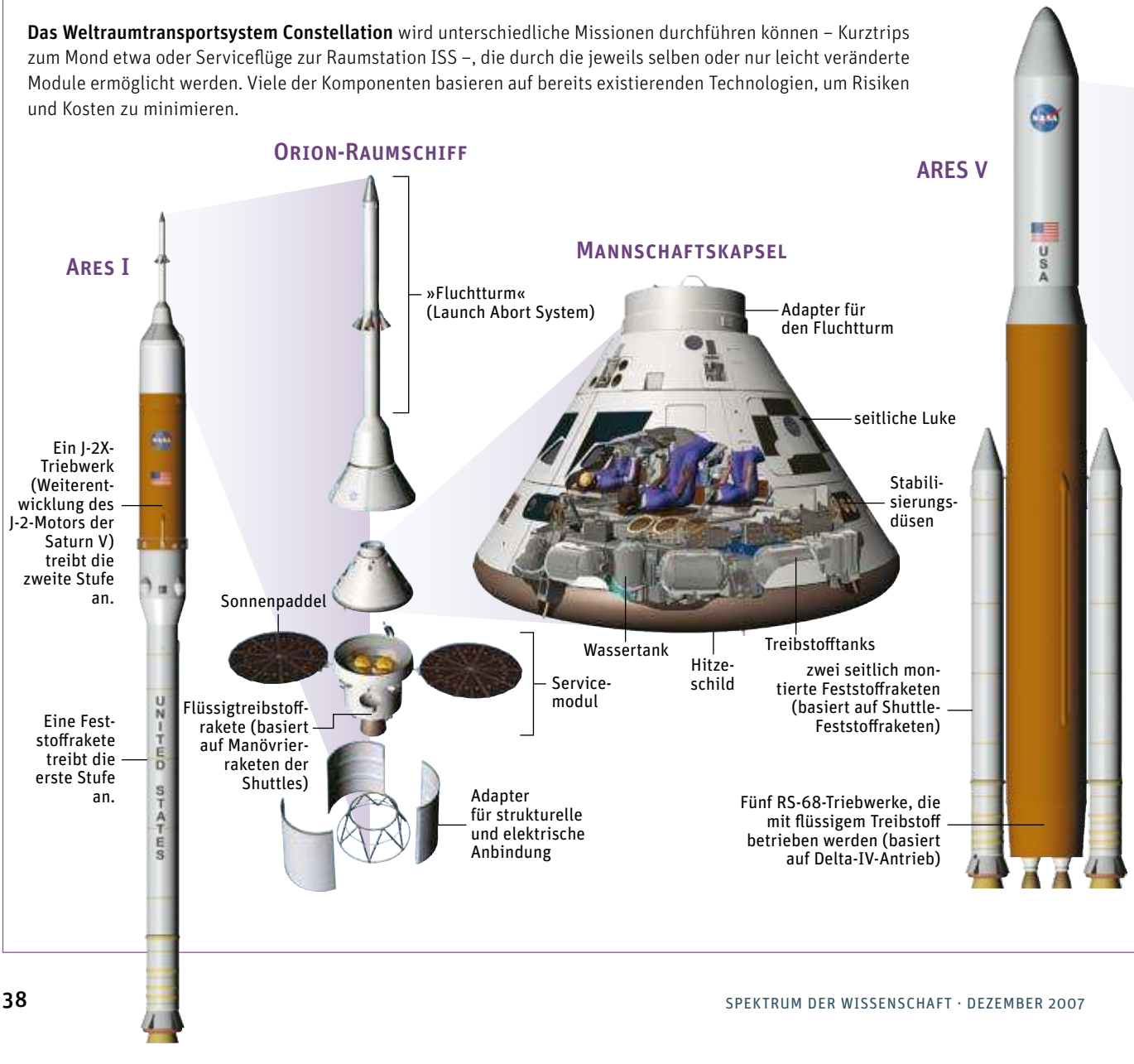
Flankiert wird der zentrale Zylinder der Ares V von zwei Feststoffraketen, deren Technik ebenfalls aus dem Shuttle-System abgeleitet wurde. Sie liefern zusätzlichen Schub, um die »Earth Departure Stage« (EDS) mitsamt der käferförmigen Mondlandefähre Artemis ins All zu befördern. Die EDS ist eine Antriebsstufe, die dem Raumschiff später helfen wird, die Anziehungskraft der Erde zu überwinden. Sie basiert auf dem ebenfalls mit Sauerstoff und Wasserstoff angetriebenen J-2X-Triebwerk, einem Nachfolger des J-2-Triebwerks der Saturn V.

In der Stille des Weltraums

Plötzlich schießt ein Blitz aus dem Heck der Ares V, gewaltige Rauchschwaden hüllen Rakete und Startrampe ein. Einen Moment später hallt ein gewaltiges Donnern über den Weltraumbahnhof, Vogelschwärme fliehen in alle Richtungen. Langsam erhebt sich die große Rakete aus einer anwachsenden grauweißen

BAUKASTENSYSTEM FÜR DEN FLUG INS ALL

Das Weltraumtransportsystem Constellation wird unterschiedliche Missionen durchführen können – Kurztrips zum Mond etwa oder Serviceflüge zur Raumstation ISS –, die durch die jeweils selben oder nur leicht veränderte Module ermöglicht werden. Viele der Komponenten basieren auf bereits existierenden Technologien, um Risiken und Kosten zu minimieren.



Wolke und wird bald immer schneller. Eine rauchige Spur am Himmel zeugt noch von ihrem Start, während sie selbst schließlich ganz aus dem Blick verschwindet. Minuten später schon erreicht Ares V die Stille des erdnahen Weltraums. Hier stößt sie ihre zwei Feststoffraketen ab. Sie fallen ins Meer, wo sie bald darauf von einer Bergungsmannschaft an Bord eines Schiffs geholt werden. Jetzt wirft die Rakete auch die Schutzhülle ab, die während des Starts die wertvolle Fracht in ihrem Bug schützte. In einer Höhe von 300 Kilometern geht das automatische Raumschiff in Parkposition und wartet auf das Rendezvous mit der Orion.

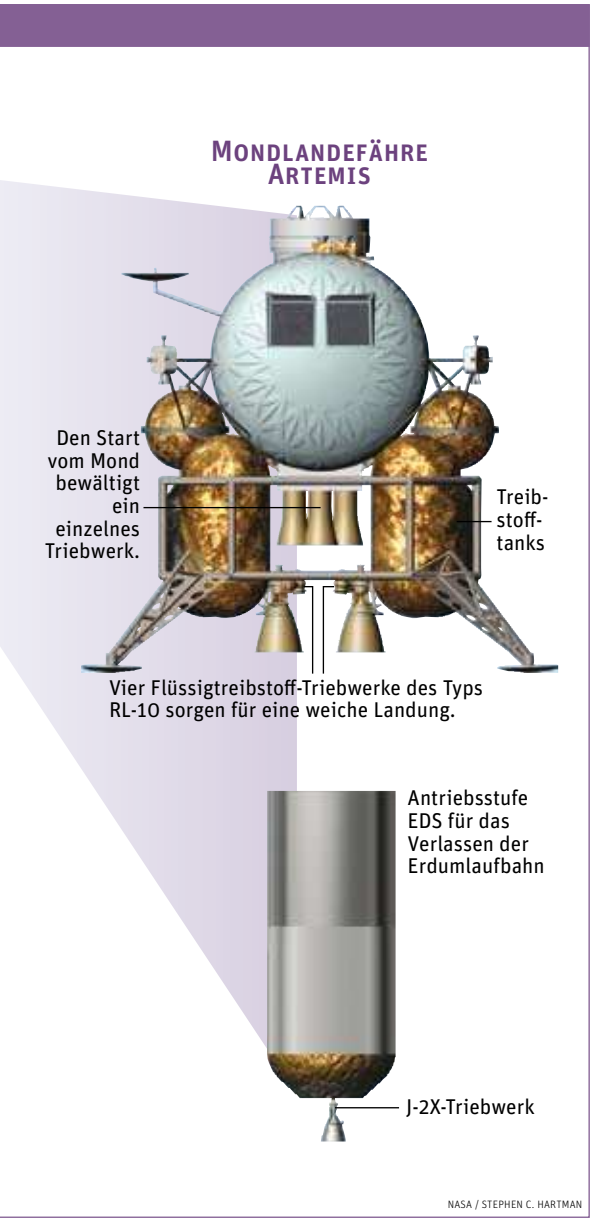
Auch auf einer anderen Abschussrampe des Kennedy-Weltraumzentrums herrscht an diesem Tag Hochbetrieb. In 98 Meter Höhe thronen die vier Mondastronauten in ihrer kegelförmigen Mannschaftskapsel, die auf der Spitze einer zweistufigen Ares-I-Rakete sitzt. Zwischen Kapsel und Rakete liegt nur noch das trommelförmige Servicemodul. Es enthält ein Antriebssystem und die meisten der Lebenserhaltungssysteme. Widerstandsfähige Verkleidungen schützen Kabine und Modul vor dem freien Spiel der Kräfte, das ihnen während des Aufstiegs durch die Atmosphäre bevorsteht.

Ares I ist schlanker als ihre große Schwester. »The stick«, »das Stöckchen«, ist ihr Spitzname. Sie besteht aus einer Feststoffrakete – ebenfalls auf Basis der Shuttle-Technik –, darüber befindet sich eine zweite Stufe mit einem J-2X-Triebwerk. Eine Art Adapter verbindet die Ares I mit den auf ihr sitzenden Modulen.

An der Spitze des Sticks: der »Fluchtturm«, der die Mannschaft bei einer Fehlfunktion der Rakete aus der Gefahrenzone schießen soll. Ein größeres technisches Problem auf der Startrampe oder im anfänglichen Steigflug nämlich, das zeigte der Challenger-Unfall im Jahr 1986, lässt der Mannschaft einer Raumfähre kaum eine Überlebenschance. Die Orion ist dagegen mit einem »Launch Abort System« (LAS) ausgestattet. Einige Sekunden lang kann dieses Startabbruchsystem eine Schubkraft entwickeln, die dem Fünfzehnfachen der Masse von Mannschaftsmodul und Fluchtsystem entspricht. Bei einer Panne noch auf dem Boden würde der Fluchtturm sich selbst und die Kapsel bis in eine Höhe von 1200 Metern befördern, von wo aus eine Landung per Fallschirm möglich ist. Auch seitlich entsteht genug Sicherheitsabstand: In der Horizontalen kann sich das System rund 1000 Meter von der Startrampe entfernen. In Kombination mit dem modernen Leit- und Kontrollsystem dürfte das LAS, so erwarten die Entwickler, der Mannschaft in 999 von 1000 (Not-)Fällen das Leben retten.

Dreamliner-Cockpit als Vorbild

Die Anspannung der Astronauten wächst. »Ten, nine, eight …« Während der Countdown läuft, haben Pilot und Kopilot die Flachbildschirme im Cockpit der Orion im Blick, deren Anzeigen sich frei konfigurieren lassen und so den unzähligen mechanischen Anzeigen älterer Cockpits überlegen sind. Vorbild des Führerstands, den ein Apollo-Astronaut kaum wiedererkennen würde, sind die auf Sicherheit ausgelegten, redundanten Systeme moderner Flugzeuge wie etwa des Boeing-787-Dreamliners. Die Steuerung erfolgt durch einen »fly-by-wire«-Mechanismus, bei dem kraftvolle Stellmotoren von elektronischen Signalen angesteuert werden. Mechanische Schalter besitzt

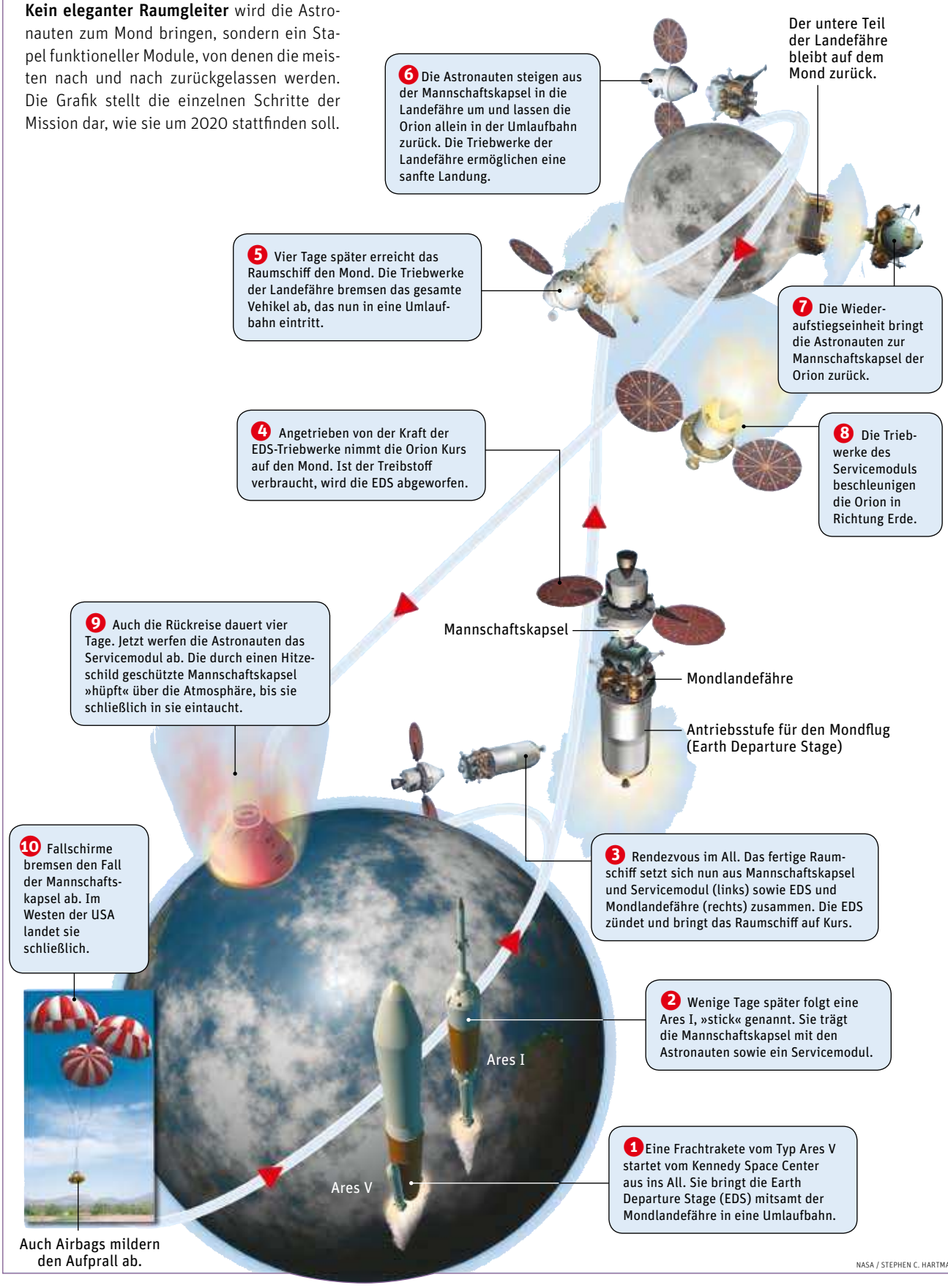


In Kürze

- Die Nasa und ihr Hauptvertragspartner Lockheed Martin entwickeln derzeit **ein Transportsystem für den Weltraum**. Bis 2020 soll es in der Lage sein, Menschen zum Mond und wieder zurück zu bringen. Einer der Grundpfeiler dieses Constellation-Programms ist das Orion-Raumschiff, das aus einer Druckkabine, einem Antriebssystem und Lebenserhaltungssystemen besteht. Hinzu kommen Trägerraketen und Servicemodule.
- **Das Orion-Programm** ähnelt dem Apollo-Mondprogramm der 1960er Jahre, ist jedoch vielseitiger und für höhere Anforderungen ausgelegt. Neben Flügen zum Mond soll Orion auch andere bemannte und unbemannte Missionen ermöglichen. Serviceflüge zur ISS zählen dazu ebenso wie vielleicht einst ein bemannter Flug zum Mars.
- Zu den Neuerungen gehören **stärkere Raketen, ein Startabbruchsystem und ein verbesserter Hitzeschild**. Bis zu sechs Astronauten werden in der Orion Platz finden, im Apollo-Programm mussten sich drei Astronauten noch mit zehn Kubikmetern Platz begnügen.

Die Mission in Etappen

Kein eleganter Raumgleiter wird die Astronauten zum Mond bringen, sondern ein Stapel funktioneller Module, von denen die meisten nach und nach zurückgelassen werden. Die Grafik stellt die einzelnen Schritte der Mission dar, wie sie um 2020 stattfinden soll.



NASA / STEPHEN C. HARTMAN

das Cockpit nur wenige, zudem ist die gesamte Technik auf sparsamen Energieverbrauch ausgelegt.

»Zero!« Die Astronauten und ihr Raumschiff durchläuft ein Zittern, gefolgt von einem Donnergrollen: Der Stick beginnt den Aufstieg gen Himmel. Mit jeder Sekunde gewinnt er an Geschwindigkeit und Höhe, die Beschleunigung presst die Astronauten in ihre Sitze. Nach nicht einmal zweieinhalb Minuten Flugzeit treiben die Feststoffraketen die Ares I bereits mit sechsfacher Schallgeschwindigkeit voran. In einer Höhe von etwa 61 Kilometern wird die erste Stufe abgetrennt. An Fallschirmen fällt sie zurück zur Erde, um dort geborgen und später wiederverwendet zu werden. Und schon zündet auch das J-2X-Triebwerk der zweiten Stufe und jagt die Orion-Kapsel weiter. Mitsamt dem Servicemodul und dem LAS durchquert die Rakete die äußeren Ausläufer der Atmosphäre. Dann liegt auch diese hinter den Astronauten. Und damit ein Teil der Gefahr: Die aerodynamische Schutzhülle hat jetzt ihre Schuldigkeit getan, ist nur noch Ballast und wird abgesprengt. Auch das LAS und seine Schutzhülle werden abgetrennt. Schließlich, in rund 100 Kilometer Höhe, schaltet sich auch das Triebwerk der zweiten Stufe ab.

Kraftsensoren für ein sanftes Rendezvous

Nun beginnt eine neue Etappe der Reise. Das Triebwerk des Servicemoduls zündet und bringt die Mannschaftskapsel endgültig in die geplante Erdumlaufbahn, wo die Manöver eingeleitet werden, die zum Rendezvous mit den dort bereits wartenden Modulen nötig sind. Das Haupttriebwerk der Orion ist die EDS, eine verbesserte Variante des Motors, der dem Spaceshuttle zum Manövrieren im Erdorbit dient. Sie zeichnet sich durch größere Schubkraft und höhere Treibstoffeffizienz aus. Das Servicemodul indessen enthält unter anderem Aggregate zur Energieerzeugung, Stauraum für wissenschaftliches Gerät, Radiatoren, die überschüssige Hitze ins All abführen, und Wasservorräte. Auch ein Teil der Bordelektronik, der Lebenserhaltungssysteme und der Klimaanlage sind darin untergebracht, um in der Kapsel Platz für die Astronauten zu schaffen. Wiederverwendbar wird das Servicemodul allerdings nicht sein. Seine tragende Struktur besteht aus leichten, aluminiumverstärkten Waben aus einem Polymerkomposit, die sich relativ einfach und preisgünstig herstellen lassen.

In der Umlaufbahn entfalten sich nun auch die schirmförmigen Sonnenpaddel des Servicemoduls. Sie gehören zu den auffälligeren Unterschieden zwischen Orion und Apollo. Die Apollo-Raumschiffe waren für Mondflüge konzipiert, die jeweils nur einige Tage dauerten. Sie bezogen ihren elektrischen Strom aus wasserstoffgefüllten Brennstoffzellen, die relativ wenig Energie speicherten – die Orion dagegen benötigt Strom für mindestens sechs Monate.

Der nächste Schritt ist ein gemächliches Aufholmanöver. Orion nähert sich dem Komplex aus EDS und Mondfähre. Dann überwacht die Besatzung, wie das automatische System für ein »weiches Einfangen« beide Schiffe ausrichtet und aneinander andocken lässt. Ein sanfter Vorgang: Kraftsensoren und elektromechanische Komponenten registrieren die auftretenden Kräfte und dämpfen sie. Zwei »mating rings«, zueinanderpassende kreisförmige Strukturen an jedem der Raumschiffe, stellen die endgültige Verbindung her. Das Fluggefährt ist nun zusammengestellt, der Hauptteil der Unternehmung kann beginnen.

Die gesamte Reise indessen wird nur das Mannschaftsmodul mitmachen. Es kann für bis zu zehn Flüge verwendet werden. Die tragende Struktur der Kapsel besteht zu großen Teilen aus einer leichten Legierung aus Aluminium und Lithium, die mit Titan verstärkt ist. Ein Hitzeschutzsystem an der Außenseite des Raumschiffs wird die Mannschaft nicht nur vor der sengenden Hitze des Wiedereintritts in

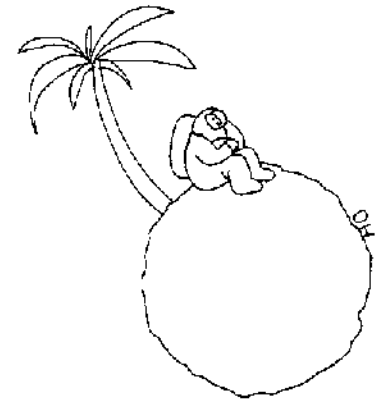
FORSCHUNGSZIELE

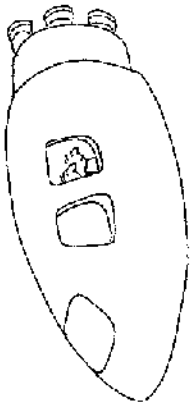
- **Vier astrophysikalische Experimente** sollen auf dem Mond stattfinden.
- Zwei davon sollen den **Abstand zwischen Erde und Mond** auf weniger als einen Millimeter genau messen.
- Ein kleines Radioteleskop soll von der Rückseite des Monds aus die in Supernovae, Quasaren und der Sonnenkorona **beschleunigten Teilchen** untersuchen.
- Ein weiterer Detektor wird **weiche Röntgenstrahlung** analysieren, die bei der Wechselwirkung zwischen Sonnenwind und Erdmagnetfeld sowie im Milchstraßenzentrum entsteht.

Ingenieure zwischen Sicherheit und Machbarkeit

NASA, LANGLEY RESEARCH CENTER

Die Nutzlast der Ares-Raketen ist begrenzt (Ares V: 130 Tonnen; Ares I: 25 Tonnen). Nun müssen die Nasa-Ingenieure höchste Sicherheit, größtmögliche Redundanz und die nutzbringendsten Einrichtungen für die Besatzung in Einklang bringen. Derzeit untersuchen sie unter anderem sich selbst aufblasende **Airbags**, die am Boden der Orion-Kapsel angebracht werden (das Bild zeigt erste Tests) und den Aufprall auf Land abmildern sollen. Als Material für den **Hitzeschild** wird kohlefaserverstärktes Phenolharz (Pica) favorisiert. Es kam bereits bei der Sonde Stardust zum Einsatz, die im Jahr 2006 Proben aus der Koma des Kometen Wild 2 zur Erde brachte und mit einer Geschwindigkeit von 13 Kilometer pro Sekunde in die Atmosphäre eintrat. Doch die Fläche des Hitzeschilds der Orion ist 40-mal größer als bei Stardust und muss daher aus einzelnen Segmenten gefertigt werden. Bald beginnen auch Tests in der **größten Vakuumkammer der Welt**. Die kathedralenartige Space Power Facility in Ohio, die ab 2008 entsprechend umgerüstet wird, ist 30 Meter hoch und bis zu 37 Meter breit. Hier werden die extremen Temperaturdifferenzen simuliert, die die Orion bei einer Mondmission aushalten muss. Dazu dienen unter anderem Infrarotstrahler und Wände, die mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden.





Ein elektrischer Lichtbogen – eine Art raumgroßer Gasbrenner – am Ames-Forschungszentrum der Nasa erhitzt Gas auf mehrere tausend Grad und beschleunigt es auf einen Hitzeschild. Ein solcher Schild mit fünf Meter Durchmesser und geformt wie eine Frisbeescheibe soll die Orion-Kapsel vor den extremen Temperaturen beim Eintritt in die Erdatmosphäre schützen.

die Erdatmosphäre schützen, sondern sichert sie schon jetzt gegen den Einschlag von Mikrometeoriten und Weltraumschrott ab.

Die Triebwerke des Lagekontrollsystems der Mannschaftskapsel werden mit gasförmigem Sauerstoff und Methan versorgt. Diese Technik ist Ergebnis des X-33-Programms der Nasa, das ein Raumfahrzeug mit nur einer Antriebsstufe in die Erdumlaufbahn bringen sollte (»single stage to orbit«), mangels Erfolgs allerdings 2001 eingestellt wurde. Früher wurden hierzu so genannte Hypergole verwendet, selbstzündende und meist giftige Treibstoffe, die aber die Astronauten ebenso gefährden wie – am Ende der Reise – das Bodenpersonal.

Die Antriebsstufe zündet. Dieses Mal ist die Orion für einen lunaren Kurztrip konfiguriert (»lunar sortie mission«), bei dem die Astronauten vier bis sieben Tage auf der Mondoberfläche verbringen. Später werden die Ingenieure die Orion auch auf »lunar outpost missions« schicken. Solche Stützpunktmissionen, bis zu 210 Tage lang und letztlich nur durch Luft-, Nahrungsmittel- und Wasservorräte begrenzt, sollen die Möglichkeit einer mehr oder minder permanenten Präsenz beweisen. Dieser Zeitraum ist auch die Zielmarke, die bei der Konstruktion der Orion immer im Auge behalten wird: Über sieben Monate lang muss sie kontinuierlich voll funktionsfähig sein. Den größten Einfluss auf alle Konstruktionsfragen hat dabei die dafür benötigte Treibstoffmenge.

Vier Tage dauert der erste Teil des »Kurztrips«, dann schwenkt die Kapsel mit ihrer Mannschaft in eine Mondumlaufbahn ein. Die Antriebsstufe haben die Raumfahrer unterwegs abgeworfen. Nun klettern sie in die Landefähre und lassen Kapsel und Servicemodul unbemannt im Orbit zurück. Wie das Apollo-Landegerät besteht auch Artemis aus zwei Komponenten: aus der mit »Beinen« versehenen Landeeinheit, die die wissenschaftliche Ausrüstung und den Löwenanteil des Proviants enthält, sowie der Wiederaufstiegsstufe, die vorerst als Wohnraum dient. Eine Woche lang haben die Astronauten nun Zeit, die Mondoberfläche zu erforschen. Dann heben sie in ihrem »Wohnzimmer« wieder ab und fliegen zurück zu Kapsel und Servicemodul. Dort wird die Aufstiegsstufe abgetrennt und der Rückflug der Orion zur Erde beginnt.

Ihre Landung auf dem Heimatplaneten verläuft indessen anders als bei den Apollo-Missionen. Diese landeten im Meer, ebenso wie schon ihre Vorgänger, die Gemini- und Mercury-Kapseln. Doch solche Landungen erfordern den Einsatz einer teuren Flotte von Bergungsschiffen, außerdem setzen sie das Raumschiff, das ja wiederverwendet werden soll, der Korrosion durch Salzwasser aus. Deshalb tut es die Orion der russischen Sojus gleich und geht auf Land nieder. Aber auch eine Landung im Meer würde sie überstehen, zum Beispiel in Notfallsituationen, bei Missionsabbrüchen oder wenn es die Wetterbedingungen erfordern.

Premiere für den »hüpfenden Wiedereintritt«

Der Landeplatz sollte natürlich in den westlichen USA oder nahe der nordamerikanischen Küste an dafür vorgesehenen Stellen liegen. Doch etwa während der Hälfte des lunaren Monats erlauben die Flugbahnen nur Landungen in der südlichen Hemisphäre. Die geografische Länge des Wiedereintrittspunkts wird durch den Zeitpunkt bestimmt, zu dem die Orion die Mondumlaufbahn verlässt. Die Breite des Wiedereintritts jedoch ergibt sich aus der Deklination des Monds, also dem Winkelabstand des Monds von der irdischen Äquatorebene, zu diesem Zeitpunkt. Dieser Wert kann durchaus ungünstig sein. Daher ist für die Orion ein »hüpfender Wiedereintritt« (skip reentry) vorgesehen – ein Novum in der bemannten Raumfahrt. Ähnlich, wie auch ein flach geworfener Stein über die Wasseroberfläche springt, nutzt die Kapsel dabei den aerodynamischen Auftrieb der Hochatmosphäre.

Die Anspannung der Raumfahrer steigt, doch zum Nachdenken bleibt nicht viel Zeit. Das Schiff muss jetzt gedreht werden, um das Servicemodul abzuwerfen und so den Hitzeschild an der Unterseite der Kapsel freizulegen. Dann benutzen die Astronauten das redundant vorhandene Navigationssystem und die Flugcomputer der Orion, um die genaue Ausrichtung der Kapsel für den Wiedereintritt zu prüfen und zu kontrollieren, ob die Bahn des Raumschiffs den korrekten flachen

NASA, AMES RESEARCH CENTER

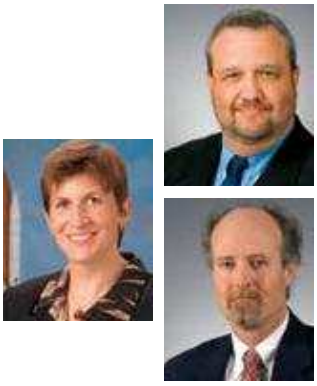
Anflugwinkel aufweist. Schließlich bereitet sich die Mannschaft auf das Einsetzen der Beschleunigungskräfte vor, die beim Auftreffen auf die Atmosphäre auftreten.

Der hüpfende Wiedereintritt beginnt langsam. Zunächst spüren die Astronauten eine schwache Beschleunigungskraft, die vom Luftwiderstand der dünnen Hochatmosphäre herrührt. Allmählich presst diese Kraft die Astronauten in ihre Sitze und steigt langsam weiter an, während ionisiertes Gas am Fenster vorbeischießt. Auch Stücke glühenden Materials, das aus dem Hitzeschild stammt, sehen die Astronauten. Kurz nachdem die Orion erstmals Kontakt mit der Hochatmosphäre hatte, prallt sie von dort ab und steigt wieder ein wenig in die Höhe. Dann dringt sie in dichtere Luftschichten ein.

Nun hängt alles vom Hitzeschutzsystem ab. Das System des Shuttles hatte zumindest einmal versagt, als die Raumfähre Columbia im Februar 2003 beim Wiedereintritt auseinanderbrach. In diesen Minuten heizt die Reibung der mit Überschallgeschwindigkeit am Raumschiff vorbeizischenden Luft auch die Unterseite der Orion auf mehrere tausend Grad Celsius auf. Die Eintrittsgeschwindigkeit einer vom Mond zurückkehrenden Orion ist um 41 Prozent höher als die Geschwindigkeit einer landenden Raumfähre, die mit rund elf Kilometer pro Sekunde auf die Atmosphäre trifft. Die Hitzebelastung ist darum um ein Vielfaches höher. Hinzu kommt, dass die Orion-Kapsel größer ist als ihr Vorgänger und so mehr Reibungsfläche bietet.

Welches Material eignet sich am besten, um einer solchen Beanspruchung zu widerstehen? Viele Ingenieure halten Pica (phenolic impregnated carbon ablator) für besonders geeignet, um daraus den Hitzeschild der Orion zu konstruieren. Es besteht aus einer Matrix von Kohlenstofffasern, die in ein Phenolharz eingebettet ist. Hohe Temperaturen lassen Teile der Pica-Schicht abbrennen, sodass ein Großteil der extremen Hitze abgeführt wird. Dabei kommt es zu chemischen Prozessen, die eine verkohlte, aber hitzebeständige Schicht zurücklassen. Durch seine geringe Wärmeleitfähigkeit verhindert Pica zudem den Transport von Wärme in das Mannschaftsmodul.

Minuten später findet der wilde Sturz endlich ein Ende. Drei große Fallschirme, ähnlich denen, die auch die Apollo-Missionen nutzten, öffnen sich. Nur einmal noch erbebt die Orion, als ihr Hitzeschild abgesprengt wird. Jetzt kann nicht mehr viel passieren: Mit einer Geschwindigkeit von gerade einmal acht Metern pro Sekunde, knapp 30 Kilometern pro Stunde, schwebt die Kapsel und mit ihr die Astronauten dem Erdboden entgegen. ◁



Charles Dingell, **William A. Johns** und **Julie Kramer White** leiten ingenieurwissenschaftliche und technische Projekte im Rahmen des Orion-Vorhabens von Nasa und Lockheed Martin. Dingell (rechts oben) ist technischer Nasa-Direktor für Orion. Er hatte auch leitende Positionen beim Spaceshuttle-, X-38-Crew-Return-Vehicle- und Orbital-Space-Plane-Programm inne. Johns ist Chefingenieur und technischer Direktor für das Orion Crew Exploration Vehicle (CEV) bei Lockheed Martin, dem Hauptvertragspartner der Nasa für das Projekt. Er arbeitete auch an den einzelnen Versionen der Centaur-Oberstufe sowie an der Entwicklung der Atlas-V-Rakete. Kramer White ist Chefingenieurin der Nasa für das Orion-CEV-Projekt. Sie blickt auf über 20 Jahre Erfahrung im technischen Management für das Spaceshuttle-, das ISS- und das X-38-Programm zurück.

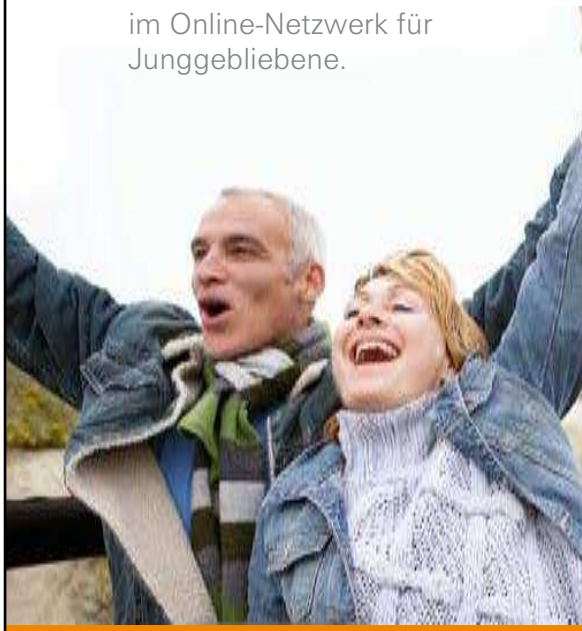
Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/910597.

Das Netzwerk für die Generation der Junggebliebenen

Knüpfen Sie Kontakte zu Menschen Ihrer Wellenlänge.

Tauschen Sie Wissen, Erfahrungen und Meinungen.

Einfach und kostenlos im Online-Netzwerk für Junggebliebene.



Jetzt mitmachen!

www.platinnetz.de

Platinnetz
Verbindungen leben.

STARTSCHUSS

für die Suche nach der großen Unbekannten

Die Dunkle Energie macht Kosmologen schwer zu schaffen. Schließlich hängt an ihr das Schicksal des ganzen Universums. Die nun angekündigten neuen Weltraummissionen, so hoffen Astrophysiker wie Max-Planck-Direktor Günther Hasinger, werden endlich eine solide Datenbasis liefern.

Von Thilo Körkel

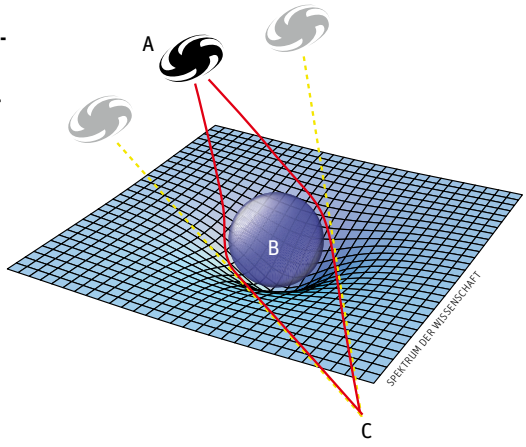
Die größten Rätsel der Wissenschaft tauchen unverhofft auf – oder genau dann, wenn man denkt, man habe gerade das letzte Geheimnis der Natur gelüftet. Schon um 1730, so berichtete der zeitgenössische Danziger Historiker Daniel Gralath, betrachtete man in Deutschland das Studium elektrischer Erscheinungen als ein abschließend behandeltes Problem. Dem jungen Max Planck soll der Münchner Physikprofessor Philipp von Jolly sogar von der Physik abgeraten haben, weil es in dieser Disziplin doch nur noch wenig zu entdecken gebe (1874 begann Planck dennoch mit dem Physikstudium). Und mittlerweile streben Forscher nach der Weltformel, der »Theory of Everything«. Doch an ein Ende ist die Wissenschaft nie gelangt: Auch wenn die Horizontlinie des Wissens gelegentlich sichtbar werden mag, der Horizont selbst weicht hartnäckig zurück.

Im Jahr 1998 begannen vollends finstere Jahre für die Astronomie

Auch heute steht vieles wieder auf Anfang, zumindest in einer ganz wesentlichen Hinsicht. Zwar reichen unsere Erklärungsmodelle bis fast zum Urknall zurück und sind, vorläufig zumindest, durchaus plausibel. Doch es haben sich zwei gewaltige Lücken aufgetan. Von rund 22 Prozent der Materie im Universum – die Zahl variiert je nach Berechnungsmethode um einige Prozentpunkte – wissen wir fast nichts. Diese »Dunkle Materie« war 1933 zu ihrem Namen gekommen, als Fritz Zwicky den Coma-Haufen beobachtete, wo sich einige tausend Galaxien drängeln. Anhand der Geschwindigkeiten dieser Sternsysteme fand der Schweizer Astronom heraus, dass der Haufen nicht allein durch die Schwerkraft seiner (sichtbaren) Bestandteile zusammengehalten werden kann, sondern dass eine zusätzliche, nicht leuchtende Substanz dazu beitragen muss.

1998 begannen vollends finstere Jahre. Plötzlich erklärten die Astronomen, die »normale« Materie, die uns umgibt oder durch Teleskope sichtbar wird, mache nur noch vier Prozent der Energiedichte des Universum aus. Damals hatten die Teams um die US-Amerikaner Brian Schmidt und Saul Perlmutter unabhängig voneinander Untersuchungen an Supernovae vorgenommen. Sie wollten herausfinden, wie schnell die Gravitation, die alle Massen im Universum zueinander hinzieht, dessen Expansion abbremsen würde (siehe »Die Vermessung der Raumzeit mit Supernovae«, SdW 3/1999, S. 40, und »Das Tempo der Expansion«, 7/2004, S. 42). Das Ergebnis: Die Expansion scheint sich seit einigen Jahrmilliarden sogar zu beschleunigen!

Dieses Resultat hatte erhebliche Konsequenzen. In der Allgemeinen Relativitätstheorie verbinden sich Masse, Energie und die



Auch der Gravitationslinseneffekt dient der großräumigen Vermessung des Alls. Das schwarz-blaue Netz symbolisiert einen zweidimensionalen »Raum«, der durch die Schwerkraft einer Masse B gekrümmt ist. Das Licht der dahintergelegenen Galaxie A folgt der Krümmung und kann so auf verschiedenen Bahnen zum Beobachter C gelangen. Dieser sieht das Bild der Galaxis A dann mehrfach. Aus diesem Effekt können Forscher auf die räumliche Verteilung von Galaxien schließen.

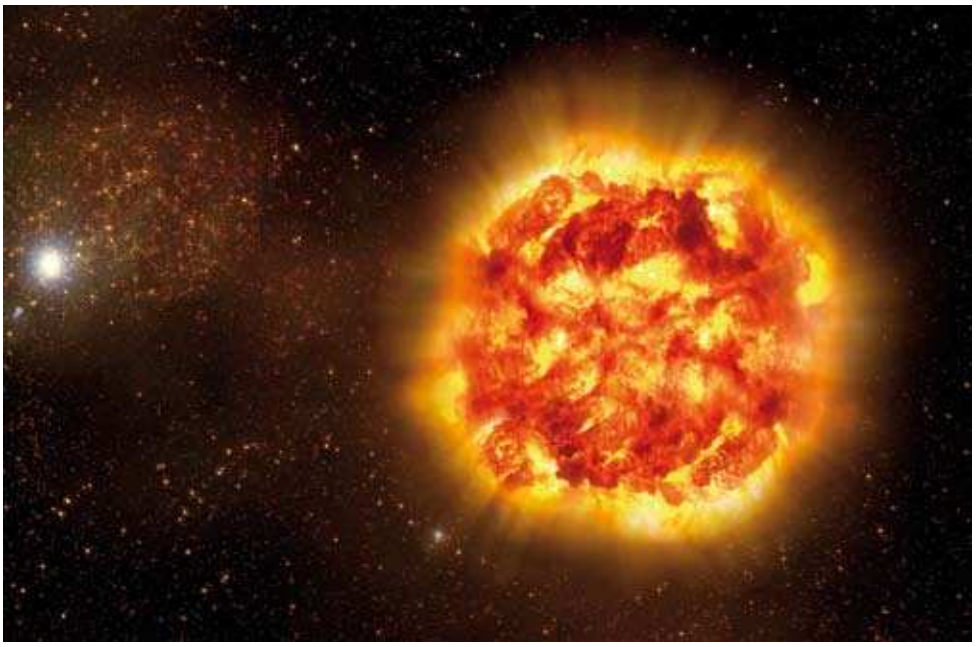


ILLUSTRATION: ESO

Die Explosion von Supernovae läuft nicht immer nach demselben Schema ab. Ihre Verwendung als »Standardkerzen«, die über eine bekannte Leuchtkraft verfügen, ist daher durch viele Faktoren eingeschränkt. Zum Beispiel kommt es zu Asymmetrien in der ausgestoßenen Materiehülle (Illustration), wie jüngst Untersuchungen am Very Large Telescope zeigten. Dies hat Auswirkungen auf die Helligkeit des sterbenden Sterns. Zudem ist es möglich, dass alte Supernovae, die aus weniger schweren Elementen als jüngere Sterne bestehen, auf andere Weise explodieren als diese.

Krümmung des Raums zu einer unauflösbaren Einheit. Daraus folgt unter anderem ein Zusammenhang zwischen der Energiedichte des Universums (zu der gemäß $E = mc^2$ auch die Masse beiträgt) und dessen Expansionsverhalten. Doch die Masse und die Energie von allem, was wir im Kosmos kennen – die Dunkle Materie eingeschlossen –, addieren sich schlicht nicht zur nötigen Energiedichte auf, die das beobachtete Expansionsverhalten erklären könnte. Selbst die Energie, die in der Krümmung des Raums stecken könnte, kommt nicht mehr als Lückenfüller in Frage. Denn im Jahr 2003 bewiesen präzise Untersuchungen der kosmischen Hintergrundstrahlung durch den Satelliten WMAP endgültig, dass das Universum als Ganzes keineswegs gekrümmt, sondern flach ist.

Galaktische Einsamkeit

Spätestens seither ist klar: Für sagenhafte drei Viertel der Energiedichte des Universums haben wir keinerlei Erklärung. Wir wissen nur: Diese »Dunkle Energie«, die ihren Namen vom amerikanischen Kosmologen Michael Turner erhielt, muss auf rätselhafte Weise eine Gegenkraft zur Gravitation darstellen. Sie sorgt dafür, dass alle Materie, die durch die Schwerkraft aneinandergebunden ist, auch eine entgegengesetzte, abstoßende Kraft erfährt. Wegen ihres negativen Vorzeichens ist sie für die zunehmend schnellere Ausdehnung unseres ohnehin expandierenden Kosmos verantwortlich.

Ende 2006 stellten Adam G. Riess und seine Kollegen darüber hinaus fest, dass die Dunkle Energie in den vergangenen neun Milliarden Jahren – zwei Drittel des Alters des Universums – einen konstanten Wert besaß. Sie hatten 23 bis zu neun Milliarden Lichtjahre entfernte Supernovae vermessen. Das Universum wird sich also wie bisher immer weiter ausdehnen, und immer weiter wird sich die Milchstraße von ihren Nachbargalaxien entfernen, sodass eines Tages keine von ihnen mehr am Himmel zu sehen sein wird. Eine Alternative wird aber ebenfalls noch diskutiert: der Big Rip, den der US-Astrophysiker Robert Caldwell prognostizierte. Demzufolge wächst die alles auseinandertreibende Kraft immer weiter an und wird in ferner Zukunft so stark, dass Galaxien, Sterne und selbst Atome schlicht auseinandergerissen würden. Doch auch die Ergebnisse, die das internationale Supernova-Projekt Essence in diesem Jahr veröffentlichte, weisen auf eine Konstanz der Dunklen Energie hin. Den zahlreichen Theorien, die von zeitlichen Variationen des Phänomens ausgehen, scheint damit ein gutes Stück Boden entzogen zu sein.

Von einigen dutzend Supernovae gleich auf das ganze Universum zu schließen wäre dennoch fahrlässig. Endgültige Bestätigung werden die theoretischen Modelle erst finden, wenn ausreichend Daten vorliegen, die die Entwicklung des Kosmos und seiner größten Strukturen möglichst gut beschreiben. »Denn die Dunkle Energie macht sich nur auf sehr großen Skalen bemerkbar«, sagt Günther Hasinger. Der Astrophysiker ist Direktor am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) in Garching und verantwortlich für das deutsche Teleskop eRosita, das demnächst an Bord eines russischen Satelliten auf die Suche nach der Dunklen Energie gehen wird. »Wir brauchen also praktisch das ganze Universum, um sie zu messen.«

GÜNTHER HASINGER

- Der Astrophysiker ist Direktor am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching sowie Professor an der Technischen Universität München.
- 2005 erhielt Hasinger den Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Seit 2002 ist er Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften.
- Seine Publikationsliste umfasst weit über 200 Aufsätze. Zuletzt veröffentlichte er auch das Buch »Das Schicksal des Universums«. Derzeit widmet er sich der Untersuchung großräumiger Strukturen im Kosmos.

KONRAD DENNERL, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EXTRATERRESTRISCHE PHYSIK (MPE)

Die halbkreisförmige Explosionswolke des Supernova-Überrests G 109.1 – 1.0 (Mitte des Bildes, bläulich) ist zwei Millionen Grad heiß und strahlt vor allem Röntgenlicht aus. Das Bild wurde vom Rosat-Satelliten aufgenommen und mit optischen Aufnahmen des Palomar-Observatoriums überlagert.

Röntgenlicht aus dem Kosmos wird auf die sieben Spiegelsysteme des deutschen Teleskops eRosita fallen, die den Himmel gleichzeitig durchmustern. Ziel ist, den mittleren Röntgenbereich bis 10 Kiloelektronenvolt mit bislang unerreichter spektraler und räumlicher Auflösung zu untersuchen.

Die groß angelegten Durchmusterungsprojekte, die jetzt anstehen, ergänzen sich gegenseitig. »Zur Gewinnung dieser Daten müssen wir alle Methoden anwenden, die wir kennen«, sagt der Institutsdirektor. Denn erst wenn unabhängige Untersuchungsmethoden zu denselben Ergebnissen führen, können diese als gesichert gelten. Die Masse der Daten muss aber auch die Tatsache kompensieren, dass sich die Messgenauigkeit nicht beliebig verfeinern lässt. »Immer häufiger stoßen wir an systematische Grenzen«, sagt Hasinger.

Bestimmte Supernovae etwa, die ein wichtiges Hilfsmittel für die Untersuchung der Dunklen Energie sind, dienen schon lange als »Standardkerzen«, da sie über dieselbe absolute Leuchtkraft verfügen. Daher kann man von dem auf der Erde ankommenden »Restlicht« auf ihre Entfernung schließen. Außerdem ist ihr Licht durch die Expansion des Universums gedehnt. Im Spektrum erscheint dieser Effekt als »Rotverschiebung«, die Spektrallinien sind also zum Roten und Infraroten hin verschoben. Gleicht man schließlich Entfernung und Rotverschiebung miteinander ab, gewinnt man Aufschluss über die Expansionsrate in der Vergangenheit.

Dieses Verfahren stößt jedoch an Grenzen: »Die Helligkeit von Supernovae variiert eben doch«, erklärt Hasinger. Man könne die Unterschiede zwar mathematisch kompensieren, so der Astrophysiker, aber trotzdem bleibe eine Ungenauigkeit von zehn Prozent. »Der nächste Schritt müsste eine Genauigkeit von einem Prozent sein, bis dahin ist aber noch ein langer Weg.«

Eine zweite wichtige Methode bei der Jagd auf die Dunkle Energie ist darum die Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung. Ihr sind messbare akustische Schwingungen aufgeprägt, die sich zum Zeitpunkt der Entkopplung von Licht und Materie, etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall, in dem damals 3000 Kelvin heißen Plasmaball ausbreiteten. Verantwortlich für die Oszillationen des Urplasmas war das Zusammenwirken von Lichtdruck und Schwerkräften. So entstanden Dichteschwankungen im Feuerball und damit auch Temperaturschwankungen in der Hintergrundstrahlung. »Aus deren Kenntnis können wir schließlich die Geometrie des Raums ableiten«, erklärt Hasinger.

Methode Nummer drei basiert darauf, dass sich die einstigen akustischen Phänomene auch in der großräumigen Verteilung der Galaxienhaufen widerspiegeln. »Die gleiche Welle, die vorher eine Schallwelle war«, sagt Hasinger, »ist jetzt eine Galaxienwelle.« Ziel der Forscher ist es daher, möglichst viele Galaxienhaufen möglichst genau zu lokalisieren.

In laufenden Jahr nun erhielt die Suche nach der Dunklen Energie sprunghaft bedeutend größeres Gewicht. Eine Reihe neuer europäischer und US-amerikanischer Weltraummissionen, zum Teil schon lange geplant, soll endlich gezielt Daten sammeln. Im März 2007 bewilligte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt 21 Millionen Euro für das Röntgenteleskop eRosita (extended Roentgen Survey with an Imaging Telescope Array). Fast denselben Betrag schießt auch die Max-Planck-Gesellschaft zu. eRositas Transport ins Weltall – das Teleskop fliegt auf dem Satelliten Spektrum-Röntgen-Gamma mit – wird die russische Raumfahrtagentur Roskosmos übernehmen, ein entsprechendes Abkommen wurde bereits unterzeichnet.

Ein Maßstab für das Universum

eRosita ist ein später Nachfahre des 1990 in Betrieb genommenen Rosat-Satelliten, ebenfalls ein MPE-Projekt. Rosat, die erste Weltraummission mit einem abbildenden Röntgenteleskop, spürte 150 000 Röntgenquellen auf, von denen etliche sogar neue Phänomenklassen repräsentierten. eRosita soll noch leistungsfähiger werden. Von ihren Spiegeln sagt Günther Hasinger, sie seien »die besten der Welt«. Die Detektoren wurden ebenfalls verbessert. Bereits ihre Vorläufer, die auf dem 1999 gestarteten Röntgensatelliten XMM-Newton der europäischen Weltraumorganisation Esa zum Einsatz kamen, stammten aus dem Halbleiterlabor, das das MPE gemeinsam mit dem Münchner Max-Planck-Institut für Physik betreibt.

Bald dürfte eRosita somit bereit sein, jeden dritten der rund 300 000 Galaxienhaufen aufzuspüren, die im (sichtbaren) Universum vermutet werden, und so die Folgen der akustischen Oszillationen im frühen kosmischen Plasmaball auf die Verteilung der Galaxien zu

untersuchen. »Damit verfügen wir dann über eine Art Maßstab, den man gewissermaßen von allen möglichen Seiten an das Universum anlegen kann«, erklärt Hasinger. Der Satellit wird das diffuse Leuchten von Galaxienhaufen im Röntgenbereich aufspüren und dabei zehnmal so tief in den Raum blicken wie einst Rosat. Außerdem soll eRosita eine Million Schwarze Löcher finden, wie sie in extrem leuchtstarken Aktiven Galaktischen Kernen beheimatet sind.

Am 18. Oktober fiel auch bei der Esa eine Vorentscheidung. Als Kandidaten für die Suche nach der Dunklen Energie, die sie im Rahmen ihres Programms »Cosmic Vision 2015–2025« aufnimmt, benannte sie die Missionskonzepte Dune und Space. 2011 soll die endgültige Wahl getroffen werden. Der französische Entwurf des Dark Universe Investigator Dune setzt unter anderem auf den Gravitationslinseneffekt. Dabei wird Licht ferner Galaxien durch die Schwerkraft, die näher gelegene Galaxien darauf ausüben, in unsere Richtung gebündelt. Space wiederum wird den gesamten Himmel im nahen Infrarot untersuchen. Auch das Satellitenduo Xeus (X-ray Evolving Universe Spectroscopy) ist im Rennen. Im Formationsflug wird es Millionen Grad heiße Röntgenquellen untersuchen und auf diese Weise das Wachstum supermassereicher Schwarzer Löcher und die Entwicklung großräumiger Strukturen verfolgen.

Unterdessen herrscht auch jenseits des Atlantiks Aufbruchstimmung. Im September erschien ein 200 Seiten starkes Papier des US-Wissenschaftsrats (National Research Council, NRC). Es gibt eindeutige Empfehlungen für die Reihenfolge der Missionen im groß angelegten »Beyond Einstein Program« der Nasa. »Beyond Einstein« soll die Voraussagen der Theorien, die der Schweizer Ausnahmephysiker formulierte, nun auch unter extremen Bedingungen und in kosmologischem Maßstab überprüfen. Ist die Dichte der Dunklen Energie konstant, wie Einstein durch die Einführung einer »kosmologischen Konstante« (die er noch Lambda-Term nannte) in seine Rechnungen postulierte und wie aktuelle Ergebnisse nahelegen? Werden wir Gravitationswellen entdecken, wie sie zum Beispiel von zwei fusionierenden Schwarzen Löchern ausgehen? Oder stellen wir vielleicht fest, dass manche Ergebnisse von Einsteins Vorhersagen abweichen?

Fünf Missionskonzepte umfasst »Beyond Einstein«. Vorgeschlagen worden waren sie schon in den 1990er Jahren, blieben aus Geldmangel aber unverwirklicht. Die »Inflation Probe« (IP) soll erstmals die Bedingungen kurz nach dem Urknall untersuchen, in der die so genannte Inflation den Kosmos binnen kürzester Zeit um einen Faktor von bis zu 1050 aufblähte. Das Konzept Constellation-X wird die Entwicklung supermassereicher Schwarzer Löcher verfolgen, die im Zentrum von Galaxien hausen, und zudem die Dynamik von Galaxienhaufen untersuchen. Die BHFP (Black Hole Finder Probe) wiederum will sich Schwarzen Löchern auf allen Skalen widmen, also Objekten mit knapp über einer Sonnenmasse bis hin zu Milliarden von Sonnenmassen.

Flaggschiff im Meer der Gravitationswellen

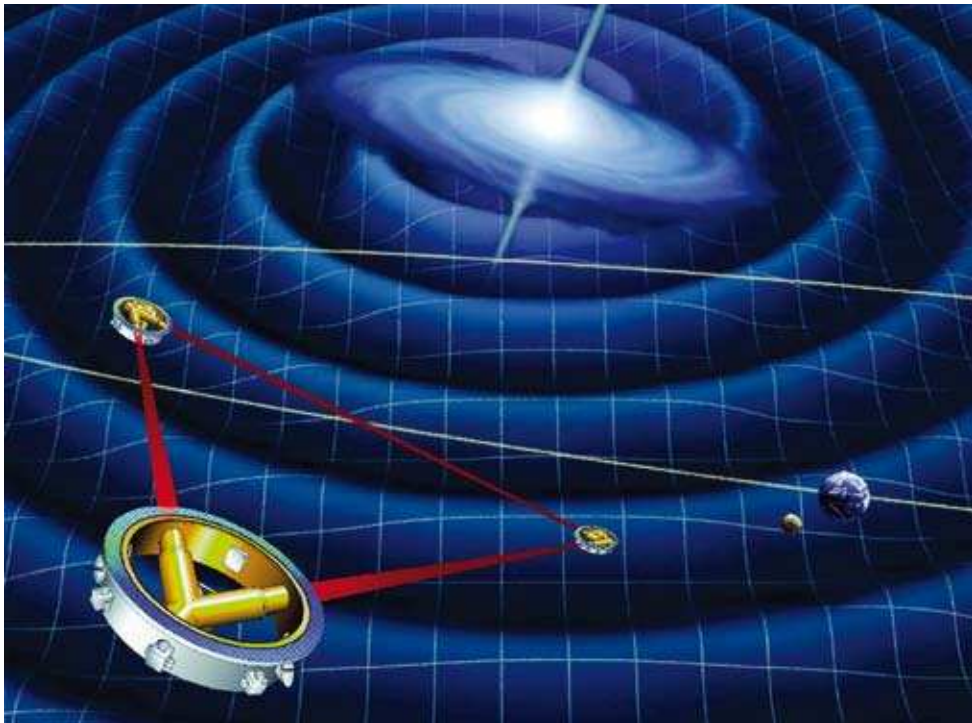
Doch all diese Projekte sind in der Prioritätenliste nun erst einmal (weit) nach hinten gerutscht. Denn zwei weitere der vorgeschlagenen Missionen, so heißt es im NRC-Bericht, »ragen dadurch heraus, dass sie die Zielrichtung des Beyond-Einstein-Programms in besonderer Weise verfolgen: Lisa und JDEM«.

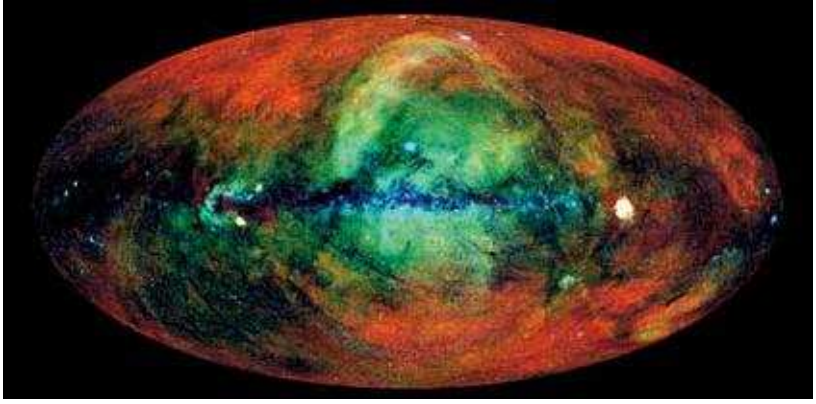
Lisa, die Laser Interferometry Space Antenna, soll das »flagship« für Beyond Einstein werden. Der Gravitationswellendetektor, den die Nasa gemeinsam mit der Esa plant, werde einen völlig neuen Weg eröffnen, das Universum zu beobachten. Für Gravitationswellen nämlich sind die Detektoren der Astronomen weiterhin blind, während das elektromagnetische Spektrum mittlerweile fast vollständig erschlossen ist.

Trotz seiner Vorzüge wird das Flaggschiff aber erst spät, nämlich zwischen 2018 und 2020, vom Stapel laufen. Das Problem ist nicht das Geld. Zwar schätzten die Gutachter Lisas Kosten auf 2,75 Milliarden US-Dollar, während das Projektteam von lediglich rund 2 Milliarden ausgegangen war. Die Technologie jedoch ist extrem anspruchsvoll. Drei identische Satelliten sollen, an den Enden eines nahezu gleichseitigen gedachten Dreiecks, um die

Der Gravitationswellendetektor Lisa wird aus drei Satelliten mit Prüfmassen bestehen, die »hinter der Erde« herfliegen. Laser werden die Abstände zwischen diesen Massen so genau vermessen, dass man aus deren Veränderung auf eintreffende Gravitationswellen schließen kann. Die untere Illustration veranschaulicht, wie Gravitationswellen (blau) eines Pulsars auf Lisa zulaufen.

ESA


ESA



MPE

MPE

Ab 1990 war Rosat neun Jahre lang in Betrieb und entdeckte zahlreiche neue Röntgenquellen. Das obere Bild zeigt den von ihm aufgenommenen Röntgenhimmel, mit der galaktischen Scheibe als Zentrum. Regionen, aus denen energiereiche Wellen stammen, sind blau dargestellt – vor allem das galaktische Zentrum sowie Supernova-Überreste.

Thilo Körkel ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Das Schicksal des Universums. Von Günther Hasinger. C.H.Beck, August 2007

NRC-Report: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12006 (kostenlose Anmeldung erforderlich)

Gravitationswellendetektor Lisa im Web: http://Lisa.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=27

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/910598.

Sonne kreisen – im Schlepptau unseres Heimatplaneten, 50 Millionen Kilometer von ihm entfernt. Dort bildet das Trio ein Laserinterferometer mit einer Armlänge von fünf Millionen Kilometern. Mittels Laserstrahlen soll es kontinuierlich die jeweiligen Abstände von Prüfmassen bestimmen, die im Inneren der Satelliten in fast perfekter Schwerelosigkeit schweben. Wenn sich der Raum krümmt, weil eine Gravitationswelle anbrandet, werden sich diese Abstände messbar verändern.

Der Erkenntnisgewinn wird außerordentlich hoch sein, so der Bericht. Selbst unter pessimistischen Annahmen dürfte Lisa für »unzweideutige und präzise Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie im starken Gravitationsfeld sorgen und detaillierte Vermessungen der Raumzeit rund um Schwarze Löcher erlauben«.

Leicht haben es sich die Gutachter bei ihrer Bewertung nicht gemacht, wie ihr Votum etwa für die Black Hole Finder Probe belegt. Zwar wären auch die erhofften BHFP-Beobachtungen von Gammastrahlenausbrüchen, die die Bildung Schwarzer Löcher anzeigen, eine »revolutionäre und für Beyond Einstein relevante Entdeckung«. Doch es bliebe unsicher, ob die BHFP-Daten schlüssige Interpretationen erlauben würden. In größeren Entfernungen beispielsweise sähe der Satellit nur Schwarze Löcher besonders hoher Leuchtkraft und Masse, die jedoch nicht die durchschnittliche Population repräsentieren. Hinzu kommt, dass der Zusammenhang zwischen der Stärke der Röntgenstrahlung und dem Wachstum der Schwarzen Löcher nicht so gut bekannt ist, dass sich die Entwicklung Letzterer tatsächlich präzise verfolgen ließe.

Doch auch gegen Lisa fanden die Gutachter ein gewichtiges Argument: Die nötige Technologie ist schlechterdings noch nicht verfügbar. Und die Lisa-Pathfinder-Mission, die vorab einige Messgeräte testen soll, wird wohl erst 2009 starten. Trotz höchsten Lobs muss das Flaggschiff nun also warten, bis die Pathfinder-Daten ausgewertet sind.

Auf Platz 1 landete am Ende das Missionskonzept JDEM (Joint Dark Energy Mission), das bis zu 1,3 Milliarden US-Dollar kosten wird. Vorantreiben soll es die Nasa in Zusammenarbeit mit dem US-Energieministerium (das für die Finanzierung von Großforschungseinrichtungen zuständig ist). JDEM wird im optischen und im nahen infraroten Spektrum nach Objekten fahnden, die eine Rotverschiebung von bis zu 1,7 und damit ein Alter von rund 10 Milliarden Jahren aufweisen.

Auswählen muss die Nasa nun selbst. Drei konkrete Missionsvorschläge, von denen einer schließlich als JDEM ins Rennen gehen wird, stehen zur Wahl. Das Advanced Dark Energy Physics Telescope »Adept« beispielsweise will über den gesamten Himmel hinweg Spektren im nahen Infrarot ermitteln und daraus die kosmische Expansionsrate auf ein Prozent genau und damit zehnmal genauer als bisher bestimmen. Auf der Aufgabenliste der Sonde stehen darum unter anderem die Ermittlung der Positionen von rund hundert Millionen Galaxien sowie der Lichtkurven von tausend Supernovae. Insbesondere bei der Galaxienverteilung, die Rückschlüsse auf die akustischen Oszillationen erlaubt, geht man von geringen systematischen Fehlern aus, sodass Adept sehr zuverlässige Ergebnisse liefern würde.

Immer wieder ein Urknall?

Wann also werden wir endlich (besser) Bescheid wissen über eines der größten Rätsel der modernen Physik? »eRosita startet 2011«, sagt Günther Hasinger. »Danach werden vier Jahre lang Messdaten eintreffen, zwei weitere Jahre sind der Auswertung gewidmet. Mit den ersten Ergebnissen rechnen wir zwischen 2015 und 2016.« Die JDEM-Mission hingegen startet frühestens 2014.

Bis dahin bleibt den theoretischen Physikern Zeit, um weiter über die wohl schlechteste Vorhersage zu grübeln, die sie je gemacht haben. Sie steht im Zusammenhang mit einem der beliebtesten Kandidaten für die Dunkle Energie, der Vakuumenergie. Dabei handelt es sich um die Energie von Quantenteilchen, die quasi aus dem Nichts entstehen und blitzschnell wieder zerfallen, und deren Allgegenwart im Kosmos letztlich für dessen beschleunigte Expansion verantwortlich sein könnte.

Sogar berechnen kann man die Größe dieser Energie. Noch allerdings sträuben sich den Theoretikern die Haare, wenn sie ihr (sehr hohes) Ergebnis mit dem (niedrigen) Wert für die Dunkle Energie vergleichen, der sich aus Beobachtungsdaten ergibt: Zwischen beiden Zahlen liegen sage und schreibe 120 Größenordnungen – eine 1 mit einhundertzwanzig Nullen. Kein Problem, sagten indessen Paul Steinhardt und Neil Turok von der Princeton University im vergangenen Jahr: Ein zyklisches Universum, in dem es immer wieder zu einem Urknall kommt, könnte selbst dieses Rätsel lösen. Es geht also weiter – auch hinter dem Horizont. ◁

KRISTALLOGRAFIE

Polyeder und Atome

Wer Atome und Ionen für harte Kugeln hält, gerät gelegentlich mit der Realität in Konflikt; aber für eine Übersicht ist die Fiktion ganz hilfreich.

Von Norbert Treitz

Wir haben im September gesehen, wie man mit oktaederstumpfförmigen Zellen einen schon fast optimalen Schaum bilden und diesen mit etwas anderen Zellen noch verbessern kann, und im November, wie sich Atome in Kristallen den Raum aufteilen. Raumfüllende Polyeder spielen dabei wichtige Rollen, also Polyeder, die in deckungsgleichen Exemplaren einer einzigen Sorte den unbegrenzten Raum dreidimensional ohne Überlappung und ohne Lücken füllen.

In diesem Heft sollen sich einige Ergänzungen dazu anschließen.

Ein raumfüllendes Polyeder kann sehr exotische Formen annehmen; aber wenn es einem Atom als Heimstatt dienen und es im Kristall gegen seinesgleichen abgrenzen soll, stehen im Wesentlichen nur noch fünf Sorten dieser so genannten Wigner-Seitz-Zellen zur Auswahl. Das unten abgebildete Periodensystem zeigt, zu welchen Gitterformen sich die Atome verschiedener Elemente unter einigermaßen humanen Druck- und Temperaturverhältnissen bequemen.

Summen von Quadratzahlen

Die erstaunliche Tatsache, dass zwischen den Ecken eines archimedischen Oktaederstumpfes der Kantenlänge 1 alle Längen der Form $\sqrt{n}$ mit ganzen Zahlen n von 1 bis 10 vorkommen, führt zu der Frage, ob das in einem Gitter aus raumfüllenden Oktaederstümpfen unendlich so weitergeht. Kommen also unter den Quadraten der Abstände von Ecken in Kelvins Schaum (gemessen in Einheiten der Kantenlänge) ausnahmslos alle natürlichen Zahlen vor?

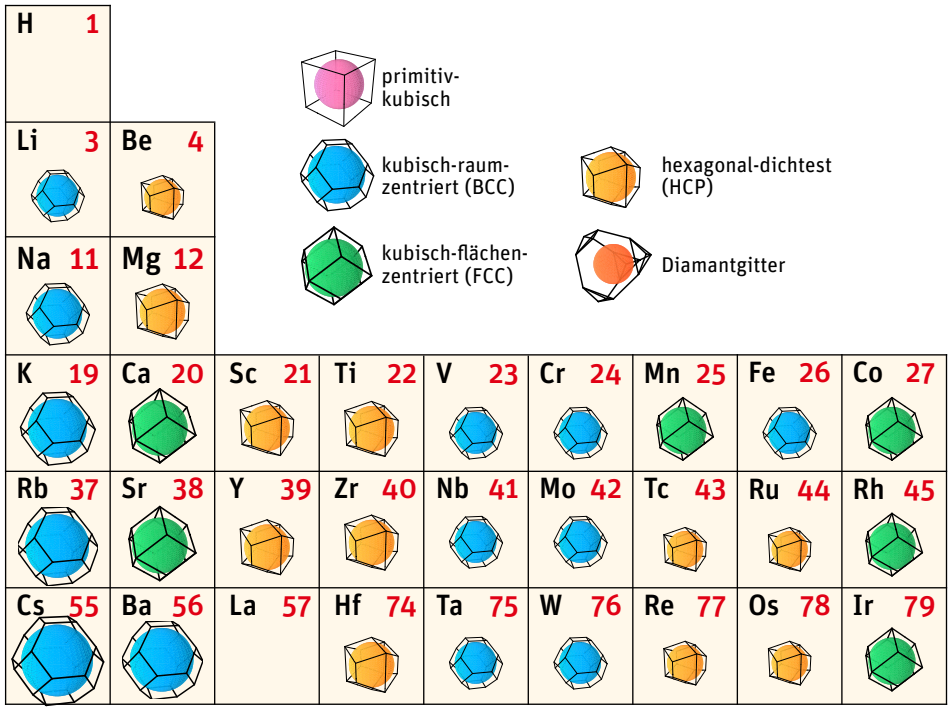
Etwas übersichtlicher wird die Frage, wenn man sie auf die Gitterpunkte des primitiv-kubischen Gitters anwendet, das heißt alle Raumpunkte mit lauter ganzzahligen Koordinaten. Mit den Koordinatendifferenzen dx, dy und dz ist auch $Z = s^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$ stets ganzzahlig (und positiv). Aber treten als Z in einem hinreichend großen Gitter alle natürlichen Zahlen auf oder vielleicht nur ganz wenige?

Betrachten wir die Frage für Gitter verschiedener Dimensionen. Im »eindimensionalen Gitter«, was einfach die Aufreihung unendlich vieler Atome auf der Zahlengeraden ist, sind die Abstandsquadrate nichts weiter als die Quadratzahlen selbst, und die sind unter den natürlichen Zahlen sehr dünn gesät: Unter deren erster Million finden sich nur tausend Stück, und für große Zahlen wird der Anteil verschwindend gering.

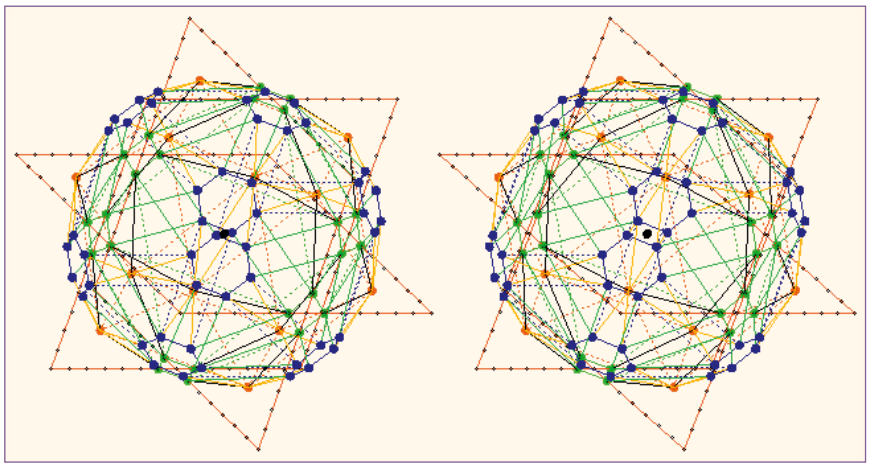
Wie sieht es in zwei Dimensionen aus? Ein kariertes Blatt aus $n \cdot n$ Kästchen hat etwa $n \cdot n$ Gitterpunkte, die von der linken unteren Ecke aus Abstandsquadrate bis rund $2n^2$ haben. Davon liegen ungefähr $\pi n^2/4$ innerhalb des Viertelkreises mit Radius n, sodass ihre Abstandsquadrate kleiner als n^2 sind. Jede dieser Zahlen kommt mindestens zweimal vor (Spiegelung an der Diagonalen). Unter allen Zahlen bis n^2 ist also ein Anteil von höchstens $\pi/8$ = 39,27 Prozent Summe zweier Quadratzahlen. Für große n liegt dieser Anteil noch weit darunter, weil viele Zahlen wie $25 = 0^2 + 5^2 = 3^2 + 4^2$ auf mehrere Weisen als Quadratsummen darstellbar sind.

Ein viel zu wenig bekannter Satz (1770) der Zahlentheorie von Joseph-Louis Lagrange (1736–1813) besagt, dass jede natürliche Zahl als Summe aus vier Quadratzahlen geschrieben werden kann (Nullen und Wiederholungen zugelassen). Demnach kommen in einem vierdimensionalen »hyperkubischen« Gitter alle natürlichen Zahlen als Abstandsquadrate vor. Wie ist es nun in unseren drei Dimensionen?

Dazu hat 1798 Adrien-Marie Legendre (1752–1833) bewiesen, dass der Anteil der Zahlen unterhalb von N, die als



In diesem Periodensystem sind Wigner-Seitz-Zellen mit Inkugeln (als »harten Atomen«) für die meisten Elemente in einem einheitlichen Maßstab gezeichnet. Einige Elemente kristallisieren je nach Druck und Temperatur auch in anderen Formen.



NORBERT TREITZ

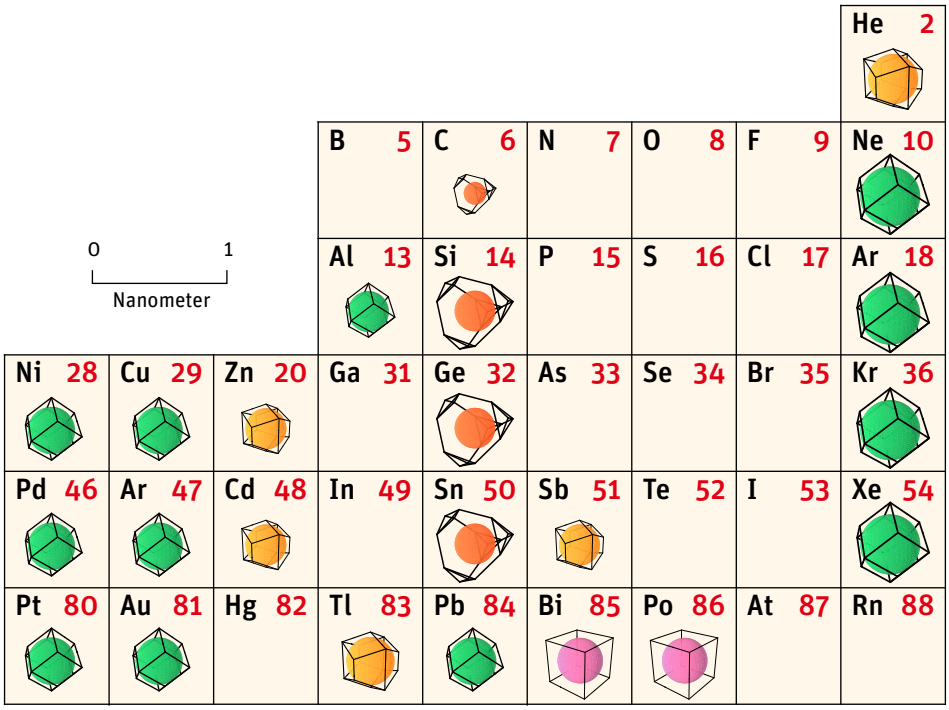
Alle 84 Gitterpunkte mit dem Abstandsquadrat 50 vom Nullpunkt bilden die Vereinigung eines Kuboktaeders (Koordinaten 0, 5, 5, rot), eines Oktaederstumpfs (0, 1, 7, grün) und eines großen Rhombenkuboktaeders (3, 4, 5, blau). In diesem Stereobildpaar kennzeichnen die durchgezogenen Linien die konvexe Hülle dieser drei Körper; deren Kanten sind, soweit sie im Inneren der konvexen Hülle liegen, gestrichelt gezeichnet.

Summen dreier Quadrate ganzer Zahlen geschrieben werden können, für N gegen unendlich gegen 5/6 konvergiert. Die Zahlen, für die das nicht geht, sind zunächst einmal alle, deren Rest bei Division durch 8 den Wert 7 hat, also 7, 15, 23, 31 …; das ist jede achte natürliche Zahl. Warum? Die Quadrate gerader Zahlen lassen den Rest 0 oder 4 bei der Division durch 8, die Quadrate ungerader Zahlen den Rest 1. Drei dieser Reste addieren sich nie zu 7. Dazu kommen noch die Produkte aus diesen Ausnahmezahlen und den Potenzen von 4. Damit erhöht sich der Anteil der Fehlanzeigen auf das $(1+1/4+1/16+1/64\ \ldots)$-Fache, also auf das 4/3-Fache von 1/8, somit auf das schon erwähnte Sechstel aller natürlichen Zahlen. Insbesondere gibt es kein Abstandsquadrat 28.

Im primitiv-kubischen Gitter hat jeder Gitterpunkt sechs nächste Nachbarn. Diese bilden die Ecken eines regulären Oktaeders. An zweitnächsten Nachbarn gibt es die zwölf Ecken eines archimedischen Kuboktaeders und als drittnächste die acht eines Würfels.

Polyeder gleichen Nachbarschaftsrangs

Allgemein gibt es für jede Rangstufe von Nachbarn ein ganzzahliges Abstandsquadrat und ein Polyeder mit der vollen Symmetrie von Würfel oder Oktaeder.



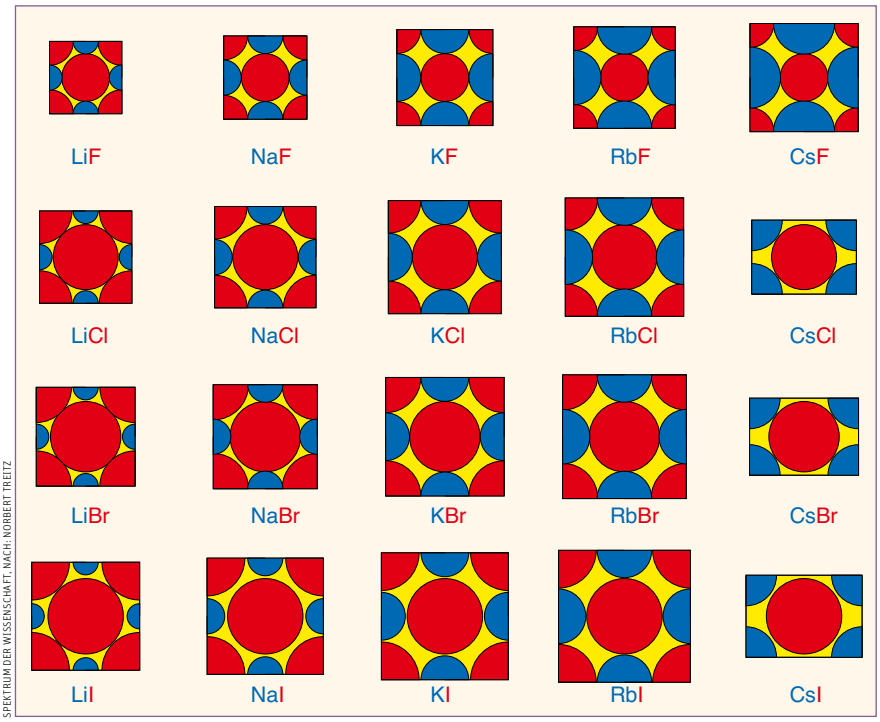
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NORBERT TREITZ

Einige Abstandsquadrate wie 7, 15, 23, 28, 31 … werden dabei übersprungen, wie wir soeben gesehen haben.

Andere werden durch mehrere Kombinationen von Koordinatenbeträgen realisiert. Das erste Beispiel ist $9 = 0^2+0^2+3^2 = 1^2+2^2+2^2$. Das Polyeder dazu ist die Vereinigung eines regulären Oktaeders und eines (nicht-archimedischen) Würfelstumpfs mit einer gemeinsamen Umkugel vom Radius 3.

Ein weiter außen liegendes Beispiel: Exakt auf der Kugel mit dem Radius $\sqrt{1001}$ um einen Gitterpunkt liegen 480 Gitterpunkte, die sich auf zehn nicht-archimedische große Rhombikuboktaeder verteilen. Eines davon hat die 48 Koordinaten $(\pm1, \pm10, \pm30)$, $(\pm10, \pm30, \pm1)$, $(\pm30, \pm1, \pm10)$, $(\pm1, \pm30, \pm10)$, $(\pm30, \pm10, \pm1)$ und $(\pm10, \pm1, \pm30)$; die anderen neun Möglichkeiten, 1001 in drei Quadrate zu zerlegen, kann Ihr Computer als Übungsaufgabe suchen.

Allgemein liefert eine Zerlegung $Z = a^2+b^2+c^2$ 48 Gitterpunkte, die dieses Abstandsquadrat Z von einem Nullpunkt aus haben, wenn a, b und c verschieden und allesamt ungleich 0 sind. Denn man kann drei ungleiche Zahlen auf sechs Arten auf die drei Dimensionen verteilen, und für jede der drei Zahlen hat man noch die Wahl des Vorzeichens frei. Sind zwei Zahlen gleich, so gibt es nur noch drei Möglichkeiten und somit drei Punkte pro Oktant, also 24 Ecken, wenn keine Null dabei ist. Bei drei gleichen Beträgen gibt es die acht Ecken des Würfels. Sind dagegen Nullen im Spiel, so fallen Punkte auf den Grenzen von zwei Oktanten zusammen. Insgesamt gibt es folgende Fälle (mit $0<a<b<c$):



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NORBERT TREITZ

Schnitte durch Alkalihalogenidkristalle in einem gemeinsamen Maßstab: Die Quadrate sind Würfelflächen im Gitter vom Halit-Typ, die Rechtecke sind Schnitte durch je zwei Würfelkanten und zwei Flächendiagonalen der Würfel im CsCl-Gitter. Für jede Verbindung wird hier nur die in der Natur bevorzugte Form gezeigt. Die Seiten der Quadrate und Rechtecke folgen maßstäblich den ziemlich genau und sicher bekannten Gitterkonstanten.

- 0, 0, *a*: reguläres Oktaeder, 6 Ecken
- 0, *a*, *a*: archimedisches Kuboktaeder, 12 Ecken
- 0, *a*, *b*: Oktaederstumpf, 24 Ecken, archimedisch für $a = b/2$
- *a*, *b*, *b*: Würfelstumpf, 24 Ecken
- *a*, *a*, *b*: kleines Rhombikuboktaeder, 24 Ecken
- *a*, *a*, *a*: Würfel, 8 Ecken
- *a*, *b*, *c*: großes Rhombikuboktaeder, 48 Ecken

Das Bild auf der vorigen Seite oben zeigt den Fall $Z = 50$.

Zwei Sorten von Ionen

Der uns geläufigste Kristall ist wohl der des Stein- oder Kochsalzes, also die Halit-Form von Natriumchlorid NaCl. Wir sind es gewohnt, ihn als Stapel von harten Kugeln von zweierlei Arten aufzufassen, nämlich Na^+- und Cl^--Ionen. Dabei bilden die Na^+-Ionen für sich ein kubisch-flächenzentriertes (FCC-)Gitter und die Cl^--Ionen für sich auch eines, das aber in genau einer Raumrichtung um eine halbe Würfelkante verschoben ist. Dieser Typ ist weit verbreitet, besonders bei Verbindungen aus nur zwei Elementen, und wird nach dem Halit benannt oder auch nach der Summenformel NaCl, obwohl Natriumchlorid auch in einer anderen Form vorkommt. Betrachtet man die Mittelpunkte aller Ionen ohne Unterscheidung der beiden Sorten, so hat Halit einfach ein primitiv-kubisches Gitter und daher die Koordinationszahl 6.

Wir widmen uns nun Alkalihalogeniden, das heißt den Verbindungen aus den Alkalimetallen Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium und Caesium mit den Halogenen Fluor, Chlor, Brom und Iod. Die Metallionen darin haben jeweils ein Elektron zu wenig, die Halogenionen eins zu viel; beider Atomhüllen erreichen damit die energetisch besonders günstige Struktur der im Periodensystem benachbarten Edelgase. Sie halten fast allein wegen der daraus folgenden elektrischen Überschussladungen der Ionen zusammen; die Van-der-Waals-Kräfte spielen eine unbedeutende Nebenrolle.

Fast alle dieser Alkalihalogenide bilden Kristalle des Halit-Typs, viele aber auch daneben solche eines anderen kubischen Typs, darunter besonders alle Caesiumhalogenide außer CsF. In diesem nach dem CsCl benannten Typ mit der Koordinationszahl 8 sitzen die Atome jeder Sorte für sich genommen in einem primitiv-kubischen Gitter; beide Gitter sind um eine halbe Würfel-Raumdiagonale gegeneinander versetzt. Zusammengenommen bilden sie ein BCC-Gitter mit der einen Sorte auf den Ecken und der anderen in den Mittelpunkten der Würfel, wobei die Rollenverteilung gleichgültig ist.

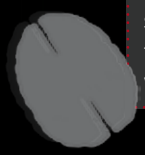
Nun wird man naiverweise annehmen, dass zum Beispiel ein Na^+-Ion immer die gleiche Größe hat, einerlei ob es in einem NaCl- oder in einem NaI-Kristall steckt, oder sogar in einem Kristall metallischen Natriums, wo es in ein Elektronengas eingebettet ist. Das stimmt einigermaßen, jedenfalls bei den Ionenkristallen. Man sollte aber die Modellvorstellung harter Kugeln etwas relativieren.

Stellen Sie sich Tennisbälle mit ihren flauschigen Oberflächen vor und gehen Sie in Gedanken zu noch flauschigeren Bällen über. Wenn Sie deren Durchmesser bestimmen, bekommen Sie mit einem Schattenwurf andere Werte als mit einer Schieblehre, und bei dieser hängt der Wert auch noch von der eingesetzten Kraft ab. Atome und Ionen haben Hüllen aus Elektronenwolken, die nirgends genau aufhören, aber für aneinander gebundene Atome oder Ionen gibt es Energieminima für bestimmte Mittelpunktsabstände, genannt »Bindungslängen«. Bei harten Kugeln wären das einfach die Summen der beiden beteiligten Radien. Die Bindungslängen sind mit Interferenzversuchen messbar, insbesondere über Gitterkonstanten von Kristallen. Die von Atom- und Ionenradien sind dagegen nicht genau zu bestimmen, eben weil es nicht wirklich harte Kugeln sind.

Speziell für die im Bild oben gezeigten Alkalihalogenide habe ich die in Tabellen zu findenden – und nicht ganz widerspruchsfreien – Ionenradien so angepasst, dass sie untereinander und mit den Gitterkonstanten konsistent sind: Alle Ionen der gleichen Art sind genau gleich groß gezeichnet, und offensichtlich passt es, zumindest für die Alkalihalogenide, ziemlich gut. ◁

Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de/artikel/910610.



SERIE Gehirn und Bewusstsein
Wie erzeugt unser Gehirn Bewusstsein? Die Artikel der Serie beleuchten diese spannende Frage aus verschiedenen Blickwinkeln.

Teil I: Fenster ins Gehirn
Teil II: Neuronale Repräsentation von Bewusstsein
Teil III: Was ist Bewusstlosigkeit?
Teil IV: Hirnfunktion im Wachkoma

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

FENSTER INS GEHIRN

Bisher galten sie als störendes nervöses Zucken. Nun ist klar, dass wir ohne eine bestimmte Sorte winziger, unbewusster Augenbewegungen nicht sehen könnten. Mehr noch: Die Zuckungen verraten unterschwellige Gedanken.

Von Susana Martinez-Conde und Stephen L. Macknik

Während Sie diesen Text lesen, bewegen sich Ihre Augen in kleinen Sprüngen von links nach rechts und bleiben kurz bei jedem Wort hängen. Ähnliches geschieht, wenn Sie zum Beispiel ein Gesicht betrachten. Auch dann drehen sich Ihre Augäpfel ruckartig hin und her, wobei der Blick jeweils für einen Moment auf hervorstechenden Merkmalen wie Mund oder Nase ruht. Mit etwas Übung können Sie diese Sprünge bei sich selbst feststellen und bewusst steuern.

Solche großen, willentlichen Augenbewegungen heißen wissenschaftlich Sakkaden. Es handelt sich allerdings nur um einen Bruchteil dessen, was Ihre Augenmuskeln tagtäglich an Zuckungen vollführen. Tatsächlich bleiben sie nie still, selbst wenn der Blick scheinbar starr auf einen Punkt gerichtet ist. Auch während Ihre Augen ein Objekt fixieren, was sie in achtzig Prozent der Wachzeit tun, ruckeln und wackeln sie unmerklich hin und her. Diese Bewegungen haben sich als unerlässlich für das Sehen erwiesen. Gelänge es Ihnen, sie irgendwie anzuhalten, würde eine statische Szene beim Blick darauf schlicht ausbleichen und im Nichts verschwinden.

Diese Erkenntnis ist allerdings noch nicht sehr alt. Fünf Jahrzehnte lang wogte der Streit darüber, ob die größten unter den unbewussten Zuckungen, die so genannten Mikrosakkaden, überhaupt einem Zweck dienen. Nach Ansicht einiger Forscher sollten sie sogar die Sicht verschlechtern, weil sie das Bild verwackeln. In neueren Untersuchungen hat eine von uns (Martinez-Conde) mit ihrer Arbeitsgruppe am Barrow Neurological Institute in Phönix (Arizona) die bisher stärksten Belege dafür gefunden, dass das minimale Zucken der Augen den Unterschied zwischen Sehen und Blindheit beim Betrachten einer statischen Szene bedeutet.

Auch in anderer Hinsicht haben Mikrosakkaden inzwischen Bedeutung erlangt: Sie helfen Neurowissenschaftlern beim Knacken des Kodes, mit dem das Gehirn Bilder der äußeren Welt verschlüsselt und in bewusste Wahrnehmungen transformiert. In den vergangenen Jahren haben wir und andere Forscher auffällige neuronale Aktivitätsmuster entdeckt, die mit den winzigen Augenbewegungen einhergehen und dabei, wie wir nun glauben, entscheidend mitbestimmen, was Menschen sehen. Mehr noch: Mikrosakka-

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

In Kürze

- Auch wenn die Augen **fest auf ein Objekt gerichtet** sind, springen sie unmerklich hin und her. Die größten solchen Fixationsbewegungen heißen Mikrosakkaden.
- Lange war unklar, ob diese Sprünge nur nervöse Zuckungen sind oder eine Funktion haben. Wie sich nun zeigen ließ, **verhindern die Mikrosakkaden**, dass beim Fixieren die lichtempfindlichen Zellen der Netzhaut durch den eintönigen Reiz ermüden.
- Vielleicht enthüllen sie aber auch **verborgene Gedanken**. So tendieren Mikrosakkaden deutlich in Richtung von Objekten, die unser heimliches Interesse erregen.

FOTO: CORBIS-ZEFA, JENS NIETH; BEARBEITUNG: JEN CHRISTIANSEN

Beim Fixieren bewegt sich das Auge immer wieder ruckartig aus dem Fokus heraus. Solche Mikrosakkaden verhindern eine Übersättigung der Sehzellen in der Netzhaut.

Winzige unwillkürliche Augenbewegungen liefern Hinweise darauf, wie das Gehirn visuelle Reize in bewusste Wahrnehmungen transformiert

den könnten einen Zugang zu unseren verborgenen Absichten eröffnen. Ihre Richtung ist nämlich nicht zufällig, sondern scheint zu verraten, wohin wir insgeheim schielen, auch wenn der Blick ganz woanders hingeht. So enthüllen die Mikrosakkaden versteckte Gedanken und Wünsche.

Ermüdung bei Eintönigkeit

Dass sich unsere Augen ständig bewegen, ist seit Jahrhunderten bekannt. Schon 1860 bemerkte etwa der deutsche Arzt und Physiker Hermann von Helmholtz, es sei sehr schwer, die Augen bewegungslos zu halten. Seiner Meinung nach verhindert das »Umherschweifen des Blickes« ein Ermüden der Lichtrezeptoren in der Netzhaut. Ein unveränderlicher Reiz führt nämlich zu neuronaler Adaptation. Die Nervenzellen gewöhnen sich daran und reagieren immer schwächer darauf, bis sie schließlich gar kein Signal mehr senden.

Das hat einen evolutionären Grund. Veränderungen in der Umgebung zu bemerken steigert die Chancen zu überleben; denn eine Bewegung im Gesichtsfeld kann bedeuten, dass sich ein Räuber nähert oder eine potenzielle Beute zu fliehen versucht. Deshalb ist das Sehsystem von Tieren darauf ausgelegt, solche Veränderungen zu erkennen. Sie veranlassen die Fotorezeptoren der Netzhaut zum Feuern. Objekte, die sich nicht bewegen, bedeuten in der Regel dagegen keine Bedrohung. Darum besteht kein starker evolutionärer Druck, von ihnen Notiz zu nehmen. Das spart Energie, schränkt aber die sensorische Wahrnehmung ein.

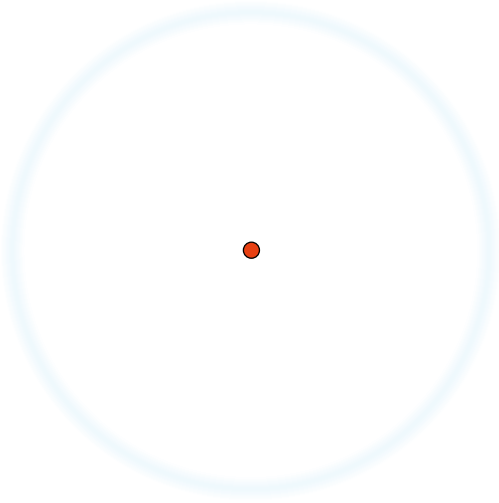
Frösche sind ein extremes Beispiel: Sie können unbewegliche Dinge wie eine Fliege, die still an der Wand sitzt, überhaupt nicht sehen. Sobald das Insekt allerdings durch die Luft schwirrt, bemerken sie es sofort und fangen es mit der Zunge.

Auch menschliche Nervenzellen adaptieren bei Eintönigkeit. Allerdings können wir im Gegensatz zum Frosch statische Objekte – sofern sie nicht gut getarnt sind – trotzdem sehen, weil unsere Augen ihre eigene Bewegung erzeugen. Dadurch verschiebt sich das Abbild der gesehenen Szene auf der Netzhaut, was die Lichtrezeptoren jeweils von Neuem erregt und der neuronalen Adaptation entgegenwirkt.

Schon ein halbes Jahrhundert vor Helmholtz hatte der Schweizer Arzt und Philosoph Ignaz Paul Vital Troxler als Erster das Verschwinden von Seheindrücken beim Hemmen der Fixationsbewegungen beschrieben.

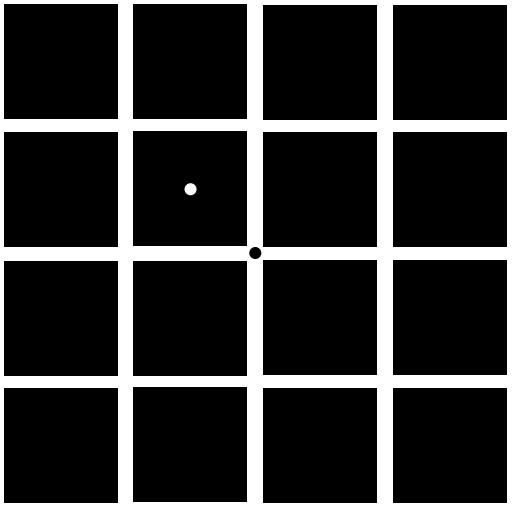
Wie sich Mikrosakkaden zu erkennen geben

Normalerweise sind uns die Fixationsbewegungen des Auges nicht bewusst. Ihre Auswirkungen aber lassen sich bei den drei hier gezeigten optischen Täuschungen beobachten.



IGNAZ P. V. TROXLER

1804 entdeckte der **Schweizer Philosoph Ignaz Paul Vital Troxler**, dass beim Fixieren eines Objekts unbewegliche Konturen in der Umgebung verblassen. Entsprechend verschwindet, wenn Sie eine Weile starr auf den roten Punkt in der Bildmitte blicken, der hellblaue Ring. Der rote Punkt scheint dann vor einem rein weißen Hintergrund zu liegen. Sobald Sie Ihre Augen etwas bewegen, taucht der Ring wieder auf.



AUS: F. J. VERHEIJEN: A SIMPLE AFTER IMAGE METHOD (...). IN: JOURNAL OF MODERN OPTICS, BD. 8, NR. 4, OKTOBER 1961, S. 309-312

Hier können Sie **Ihre Fixationsbewegungen** tatsächlich »sehen«. Blicken Sie etwa eine Minute lang auf den schwarzen Punkt in der Mitte und dann auf den weißen im benachbarten schwarzen Quadrat. Sie werden feststellen, dass sich das dunkle Nachbild des weißen Gitters ständig verschiebt. Das ist die Folge der Fixationsbewegungen Ihrer Augen.

Wie er 1804 berichtete, verblassen die unbewegten Objekte in der Umgebung eines starr fokussierten Punkts mit der Zeit (siehe linke Zeichnung im Kasten unten). Beim bewussten Festhalten des Blicks werden die Zuckungen des Augapfels schwächer und seltener. Außerdem sind sie weniger wirksam, wenn der Bildpunkt weit vom Zentrum entfernt liegt. Das genügt, um das Sehvermögen dort deutlich zu verschlechtern. Im Alltag bemerken wir nichts davon, weil wir dem Rand des Blickfelds, solange sich dort nichts bewegt, keine Aufmerksamkeit schenken.

Ein völliger Stillstand aller Augenbewegungen lässt sich nur im Labor erreichen. In den frühen 1950er Jahren befestigten Forscher dazu einen kleinen Diaprojektor auf einer Kontaktlinse, die sie dann mit einer Saugvorrichtung auf dem Auge einer Versuchsperson anbrachten. Weil sich das durch die Linse projizierte Bild mit dem Augapfel mitbewegte, fiel es stets auf die gleiche Stelle der Netzhaut. Folglich adaptierten die Sehzellen, und das Bild verblasste. Für den gleichen Effekt nehmen Wissenschaftler heute die Fixationsbewegungen per Kamera auf und übermitteln die Daten an ein Projektionssystem, welches das dargestellte Objekt dann nachführt.

Die ersten solchen Versuche in den späten 1950er Jahren ergaben teils widersprüchliche Resultate. Dabei unterdrückten Forscher mit der Kontaktlinsenmethode zunächst jegliche Augenbewegungen inklusive der größeren, bewussten Sakkaden. Anschließend überlagerten sie dem Bild künstlich mikrosakkadenähnliche Zuckungen. Einige Forscher berichteten, dass die Probanden daraufhin wieder sehen konnten. Bei den Experimenten anderer Gruppen war das jedoch nicht der Fall.

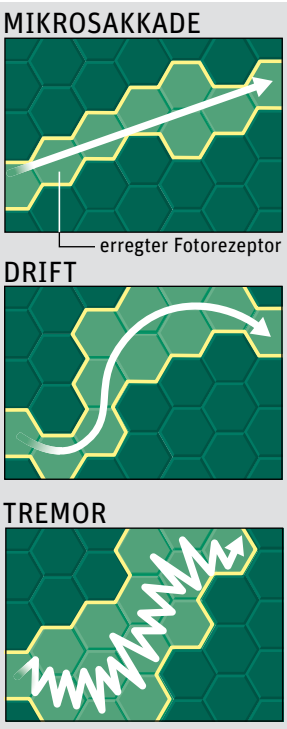
Die Wahrheit ließ sich nur schwer feststellen, weil die angewandte Methode zum Ausschalten der Augenbewegungen unvollkommen war. So kann eine Kontaktlinse verrutschen, wodurch sich das projizierte Bild auf der Netzhaut verschiebt. Daher bestand die Möglichkeit, dass solche Nebeneffekte und nicht die überlagerten Mikrosakkaden die Versuchspersonen wieder sehen ließen.

Nur ein nervöses Zucken?

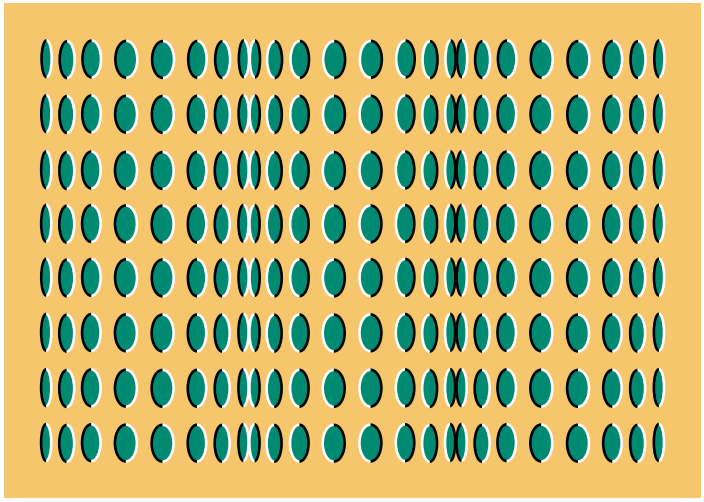
Etwa zur gleichen Zeit identifizierten Forscher zwei weitere Arten von Fixationsbewegungen: die Drift und den Tremor. Erstere ist ein langsames, mäandrierendes Umherschweifen des Auges, das zwischen den sprunghaften, geradlinigen Mikrosakkaden auftritt. Der Tremor

BEWEGLICHE ZIELE

Es gibt drei Arten von Fixationsbewegungen der Augen: Mikrosakkade (gerade Linie), Drift (Schlangenlinie) und Tremor (der Drift überlagerte Zickzacklinie). Sie alle verschieben das Abbild der Umwelt auf der Netzhaut über ein Mosaik von Fotorezeptoren (lichtempfindlichen Zellen) hinweg.



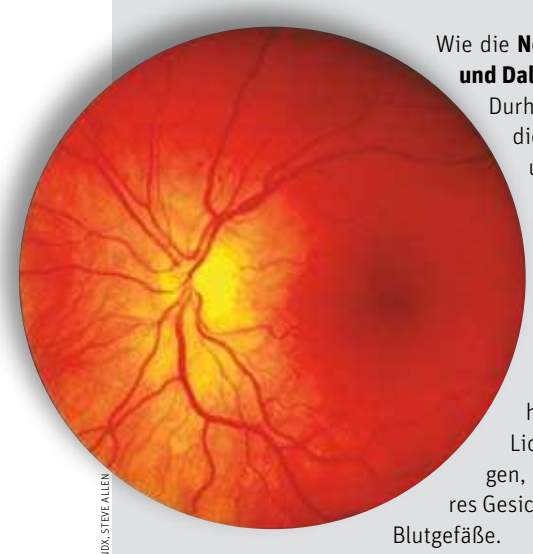
JEN CHRISTIANSEN



Wenn Sie Ihre Augen über das obige Muster wandern lassen, werden die drei »Rollen« sich zu drehen beginnen. Fixieren Sie nun einen der grünen Punkte in der Mitte des Bilds, so verlangsamt sich die vorgetäuschte Bewegung oder stoppt sogar. Daraus schließen die Autoren des Artikels, dass die Illusion der Drehung mit Fixationsbewegungen zusammenhängt. Worin genau die Verbindung besteht, ist allerdings unklar.

AKIYOSHI KITAOKA, © 2004

Blutgefässe werden unsichtbar



CORBIS-BRANDX, STEVE ALLEN

Wie die **Neurowissenschaftler David Coppola und Dale Purves** von der Duke-Universität in Durham (North Carolina) entdeckten, sind die Blutgefäße der Netzhaut, die dort unbeweglich immer an der gleichen Stelle liegen, schon nach achtzig Millisekunden auf Grund von Sättigungseffekten nicht mehr zu sehen. Das können Sie an sich selbst überprüfen. Schließen Sie im Dunkeln die Augen und beleuchten Sie eines von der Seite mit einer (nicht zu hellen) Taschenlampe. Wenn Sie das Licht schnell genug hin und her bewegen, erhaschen Sie vielleicht am Rand Ihres Gesichtfelds einen flüchtigen Blick auf Ihre Blutgefäße.

Adaptation von Nervenzellen gibt es bei allen Sinnesarten. So nehmen wir einen gleich bleibenden Geruch nach einiger Zeit nicht mehr wahr. Wer neben einer Autobahn wohnt, hört den ständigen Lärmpegel nur noch, wenn er bewusst darauf achtet. Selbst die Wahrnehmung von Druck verschwindet. So spüren Sie Ihre Schuhe zwar beim Anziehen, wenig später aber nicht mehr. Wackeln Sie allerdings mit den Zehen, kommt die Empfindung zurück. Denselben Zweck erfüllen Fixationsbewegungen: Sie lassen das Bild auf der Netzhaut hin und her wackeln, damit es nicht verschwindet.

wiederum besteht aus einem feinen, schnellen Zittern, das diese Drift verwackelt.

Die Funktion der verschiedenen Mikrobewegungen auseinanderzuhalten ist bis heute nicht gelungen. Mikrosakkaden sind die größten unter ihnen und diejenigen, die am genauesten untersucht wurden. Sie verschieben ein Bild auf der Netzhaut über Dutzende bis Hunderte der lichtempfindlichen Fotorezeptorzellen hinweg. Zu diesen gehören die Zapfen, die für das detaillierte Sehen und die Farbwahrnehmung zuständig sind, und die empfindlicheren Stäbchen, die auch noch bei schwachem Licht und in der Peripherie ansprechen. Der Tremor verursacht dagegen nur Ausschläge von der Größe eines einzelnen Fotorezeptors.

Mikrosakkaden lösen Reaktionen in den Nervenzellen aller bisher untersuchten visuellen Hirnbereiche aus

Jahrzehntelang sprachen viele Wissenschaftler den Fixationsbewegungen überhaupt jegliche Bedeutung für unser Sehvermögen ab. Sie machten geltend, dass manche Menschen ihre Mikrosakkaden einige Sekunden lang unterdrücken könnten, ohne das zentrale Sehvermögen zu verlieren. Tatsächlich verschwindet in Troxlers Test nur der äußere Ring, während der rote Punkt in der Mitte erhalten bleibt. Auch bei Präzisionsaufgaben wie dem Zielen mit einem Gewehr oder dem Einfädeln unterdrücken wir ohne merkliche Einbuße im Sehvermögen für kurze Zeit unsere Mikrosakkaden. Im Jahr 1980 erklärten die Psychologen Eileen Kowler und Robert M. Steinmann von der Universität von Maryland in Baltimore deshalb Mikrosakkaden für unnütz. Sie sahen darin nur ein nervöses Zucken.

Dabei blieb es bis in die späten 1990er Jahre, als Wissenschaftler sich wieder für Fixationsbewegungen zu interessieren begannen. Nun suchten sie erstmals nach möglichen neuronalen Reaktionen darauf im Auge oder Gehirn. Wir selbst trainierten ab 1997 zusammen mit dem Nobelpreisträger David H. Hubel von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) Affen darauf, einen kleinen Punkt auf einem Computerbildschirm zu fixieren. Zusätzlich befand sich an einer anderen Stelle ein unbeweglicher Lichtbalken. Während die Affen auf den Punkt starrten, registrierten wir sowohl ihre Augenbewegungen als auch die elektrische Aktivität der Nervenzellen des seitlichen Kniehöckers im Zwischenhirn und der primären Sehrinde im hinteren Cortex (siehe Kasten rechts). Bei den Experimenten, deren Ergebnisse wir 2000 und 2002 veröffentlichten, platzierten wir den Lichtbalken so, dass er in den untersuchten Neuronen eine möglichst starke elektrische Antwort in Form von Nervenimpulsen, so genannten Spikes, hervorrief.

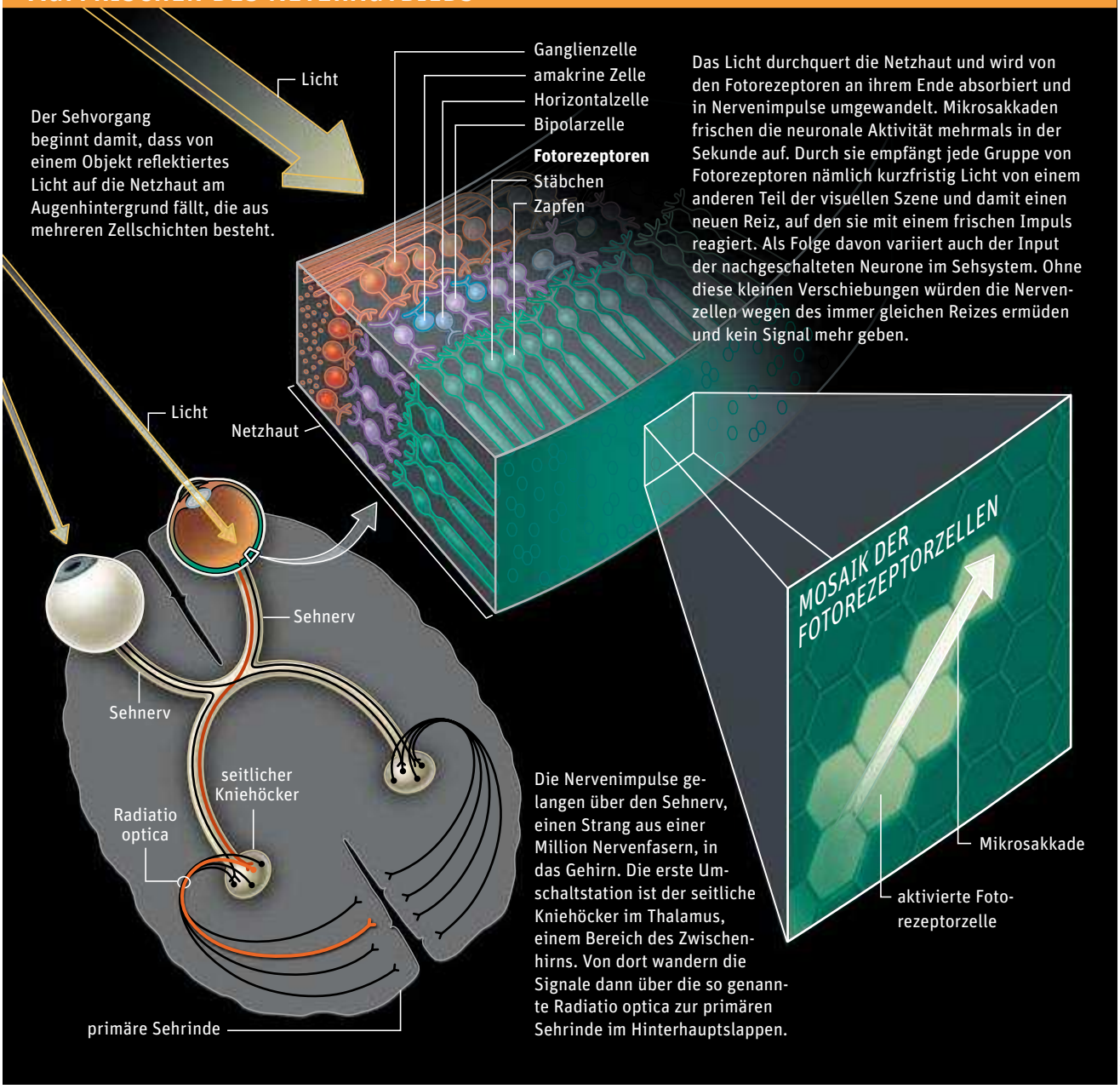
Wie sich zeigte, erhöhten Mikrosakkaden die Spike-Frequenz der Nervenzellen in beiden Hirnarealen, indem sie unbewegte Reize wie den Lichtbalken in das rezeptive Feld eines Neurons – den Teil des Sehbereichs, von dem es erregt wird – hinein- und wieder herausbewegten. Unser Ergebnis stützte somit die alte Vermutung, dass die winzigen Zuckungen dazu dienen, die Adaptation der Fotorezeptoren und damit ein Verblassen des auf die Netzhaut fallenden Bilds zu verhindern.

Mit dieser Annahme kamen wir zugleich dem Kode des visuellen Systems für bewusstes Sehen auf die Spur. Bei den Affenversuchen gingen die Mikrosakkaden nämlich meist mit Salven hochfrequenter Spikes, so genannten Bursts, und nur selten mit einzelnen Impulsen einher. Demnach sind solche Salven im Gehirn ein Zeichen für bewusstes Sehen.

Die Nagelprobe

Tatsächlich lösen Mikrosakkaden, wie unsere Experimente und die anderer Forscher ergaben, Reaktionen in den Nervenzellen aller untersuchten visuellen Hirnbereiche aus. Trotzdem blieben Zweifel an ihrer Bedeutung für den Sehvorgang; denn die widersprüchlichen Ergebnisse der alten Versuche zum Ausschalten der Augenbewegungen waren nicht ausge-

Auffrischen des Netzhautbilds



räumt. Deshalb begannen wir vor einigen Jahren am Barrow Neurological Institute analoge Experimente.

Dabei nutzten wir eine andere Methode zur direkten Messung des Zusammenhangs zwischen Mikrosakkaden und Sehvermögen. Wir ließen Freiwillige einen Adaptationsversuch nach Troxler durchführen. Sie sollten einen kleinen Punkt fixieren und dabei durch Drücken oder Loslassen eines Knopfes anzeigen, ob sie einen unbeweglichen Gegenstand am Rand des Blickfelds sehen konnten. Wie sich erwies, verschwand das Objekt beim intensiven Starren und tauchte wieder auf, wenn die Konzentration nachließ. Die Fixationsbewegungen der Testpersonen maßen wir mit einem hochgenauen Videosystem, einem so genannten Eye Tracker.

Wie erwartet, wurden die Mikrosakkaden kurz vor dem Verschwinden des Gegenstands seltener, kleiner und langsamer. Ihr Fehlen oder Erlahmen führte somit zur Adaptation und ließ das Objekt verblassen. Gleichfalls in Einklang mit unserer Hypothese nahmen die Mikrosakkaden, kurz bevor der Gegenstand wieder auftauchte, an Zahl, Größe und Geschwindigkeit zu. Diese Ergebnisse, die wir 2006 veröffentlichten, belegten erstmals unzweideutig, dass die winzigen Zuckungen des Augapfels das Sehvermögen beim Fixieren verbessern, wobei große, schnelle Sprünge am wirksamsten sind. Da die Augen in rund acht-

Auch wenn Sie zwanghaft von dem Objekt Ihrer Begierde wegblicken – die Zuckungen Ihres Augapfels in seine Richtung verraten Sie

zig Prozent der Wachzeit auf einem Gegenstand ruhen, spielen Mikrosakkaden in der visuellen Wahrnehmung also eine enorm wichtige Rolle.

Unsere Arbeit ist aber nicht nur von theoretischem Interesse. Sie sollte auch helfen Krankheiten oder Störungen besser zu verstehen und zu behandeln, bei denen die Mikrosakkaden behindert sind – etwa infolge einer Lähmung des okulomotorischen Nervs, der fast alle Augenmuskeln steuert. Auch die Amblyopie (Schwachsichtigkeit) geht gewöhnlich mit anomalen Fixationsbewegungen einher. Diese Krankheit, bei der ohne erkennbare organische Ursache die Sehschärfe nachlässt, ist bei 20- bis 70-Jährigen die häufigste Ursache für den Sehverlust auf einem Auge. In schweren Fällen können eine übermäßige Drift und zu wenige Mikrosakkaden dazu führen, dass einzelne Objekte oder selbst große Teile des Gesichtsfelds beim Fixieren verschwinden.

Wenn Normalsichtige den Blick auf einen Gegenstand richten, muss das okulomotorische System eine schwierige Gratwanderung zwischen zu wenigen und zu vielen Fixationsbewegungen vollbringen, damit das Bild nicht entweder verblasst oder aber verwackelt. Versteht man genauer, wie diese heikle Balance zu Stande kommt, lässt sich ein gestörter optischer Bewegungsapparat vielleicht eines Tages neu justieren. Bei vielen Krankheiten sind die Fixationsbewegungen der Augen beeinträchtigt. Ihre Untersuchung ist daher zweifellos ein fruchtbares Gebiet, das bislang kaum erforscht wurde.

Die Bedeutung der Mikrosakkaden könnte aber weit über den Sehvorgang hinausreichen. Vielleicht offenbaren die winzigen Augenbewegungen zugleich unterschwellige mentale Vorgänge. Auch wenn unser Blick starr auf etwas gerichtet ist, kann sich die Aufmerksamkeit nämlich bewusst oder unbewusst auf Objekte außerhalb des Fokus richten, die unser Interesse erregen. Das haben psychologische Untersuchungen gezeigt.

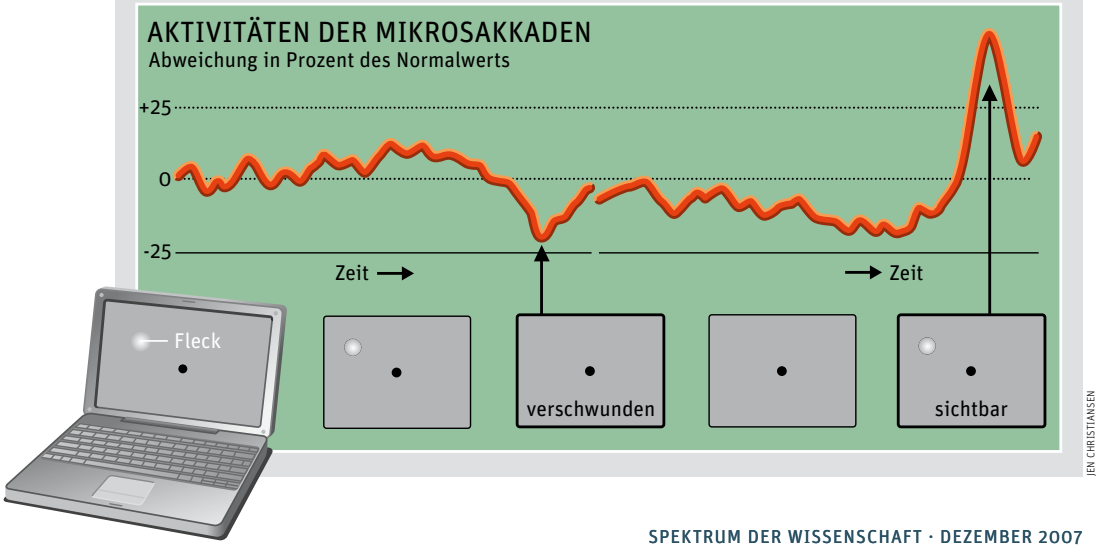
Tor zu den Gedanken?

Neuere Forschungsergebnisse deuten nun darauf hin, dass Mikrosakkaden die Objekte unseres heimlichen Interesses verraten, indem sie vorwiegend in deren Richtung gehen. Ziad M. Hafed und James J. Clark von der McGill-Universität in Montreal (Kanada) haben das in einem 2002 publizierten Experiment nachgewiesen. Dabei sollten Probanden den Blick auf einen Punkt in der Mitte eines Computerbildschirms richten, an dessen Rand sich ein Fleck befand, der nach einiger Zeit seine Farbe wechselte. Tatsächlich gingen die per Eye Tracker verfolgten Mikrosakkaden nach dem Farbumschlag überdurchschnittlich oft in Richtung des Flecks. Demnach verraten die winzigen Augenbewegungen, wenn sich der Gegenstand der Aufmerksamkeit insgeheim verschiebt.

Eine solche Verschiebung spiegelt sich auch in der Frequenz der Mikrosakkaden wider.

Sehen dank Augenzuckungen

In einem kürzlich durchgeführten Experiment demonstrierten die Autoren den Zusammenhang zwischen Mikrosakkaden und Sehvermögen. Testpersonen mussten einen Punkt mitten auf einem Computerbildschirm fixieren und sagen, ob sie einen unbewegten Fleck am Schirmrand sehen konnten oder nicht. Tatsächlich verschwand dieser Fleck zunächst scheinbar, tauchte schließlich aber wieder auf. Parallel dazu nahmen die Mikrosakkaden, wie ihre Registrierung ergab, anfangs an Zahl und Stärke ab. Kurz vor dem Wiedererscheinen des Punktes stieg ihre Häufigkeit jedoch über den Normalwert an.



JEN CHRISTIANSEN

BRIAN MARANAN PINEDA

Mikrosakkaden offenbaren, ob zum Beispiel eine Schokoladentorte Ihre Aufmerksamkeit insgeheim gefangen nimmt, auch wenn Sie nicht hinschauen. Aber keine Sorge: Ohne technische Hilfsmittel kann Ihr Gegenüber die winzigen Augenbewegungen nicht erkennen.

Das demonstrierten der Computer-Neurowissenschaftler Ralf Engbert und der Kognitionspsychologe Reinhold Kliegl von der Universität Potsdam in einem 2003 veröffentlichten Experiment. Dabei ließen sie am Blickfeldrand einer Versuchsperson, die ein Objekt fixierte, plötzlich ein optisches Signal erscheinen. Daraufhin sank, wie sich herausstellte, die Häufigkeit der Mikrosakkaden zunächst kurz ab und schnellte dann über den Normalwert hinaus. Außerdem tendierten die sprunghaften Augenbewegungen zu dem Signal hin. Frequenz und Richtung der Mikrosakkaden können also plötzliche Veränderungen in unserem Blickfeld anzeigen, die unsere Aufmerksamkeit wecken, ohne dass wir direkt hinschauen.

Es hilft demnach nichts, wenn Sie zwanghaft vom letzten Kuchenstück auf dem Tisch oder einem anderen Gegenstand Ihrer heimlichen Begierde wegblicken: Die nervösen Sprünge Ihres Augapfels verraten Sie. Allerdings braucht Sie das nicht zu beunruhigen. Nur Wissenschaftler können die winzigen Augenbewegungen im Labor messen und Schlüsse daraus ziehen, Ihre normalen Mitmenschen nicht. Oder wie es im Lied heißt: Es bleibet dabei, die Gedanken sind frei. ◁

Susana Martinez-Conde hat an der Universität von Santiago de Compostela in Spanien in Medizin und Chirurgie promoviert. Sie leitet die Arbeitsgruppe Visuelle Neurowissenschaften am Barrow Neurological Institute in Phönix (Arizona). Dort ist **Stephen L. Macknik** Direktor des Laboratoriums für Verhaltensneurophysiologie. Sein Doktorgrad in Neurobiologie stammt von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts).

Microsaccades counteract visual fading during fixation. Von S. Martinez-Conde et al. in: Neuron, Bd. 49, S. 297, 2006

Fixational eye movements in normal and pathological vision. Von S. Martinez-Conde in: Progress in Brain Research, Bd. 154, S. 151, 2006

The role of fixational eye movements in visual perception. Von S. Martinez-Conde et al. in: Nature Reviews Neuroscience, Bd. 5, S. 229, 2004

Microsaccades uncover the orientation of covert attention. Von R. Engbert und R. Kliegl in: Vision Research, Bd. 43, S. 1035, 2003

Microsaccades as an overt measure of covert attention shifts. Von Z. M. Hafed und J. J. Clark in: Vision Research, Bd. 42, S. 2533, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/910595.

wichtige **online** **adressen**

Kleines 1 x 1 der Relativitätstheorie
Einsteins Physik mit Mathematik der Mittelstufe
ISBN-13: 978-3-8334-6291-7
www.1x1relativitaet.de

WISSENSlogs
Science unplugged
www.wissenslogs.de

BRAINLOGS
Blogs für die Welt im Kopf
www.brainlogs.de

Kernmechanik – Optimiertes Modell: Kernspin + Dipolmomente
www.kernmechanik.de

KOSMOpod
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de

Parship
die größte Online-Partneragentur
www.parship.de

Platinnetz
das Netzwerk für die Generation der Jungebliebenen
www.platinnetz.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

TRINKER: GETTY IMAGES / PHOTONICA; IAN MCKINNELL: BABYGESICHT: GETTY IMAGES / TAXI, BRIAN BERMAN: BEARBEITUNG: EMILY HARRISON

Viele Kinder von Alkoholikern sind suchtgefährdet – ihre Hirnerregungsmuster funktionieren ungewöhnlich.

VERERBTE TRUNKSUCHT

Gene leisten zur Alkoholsucht einen wesentlichen Beitrag. Diese Erkenntnis verspricht nicht nur bessere Therapien, sondern erlaubt auch gezieltere Vorsorge.

Von John I. Nurnberger jr. und Laura Jean Bierut

Trunksucht scheint oft in der Familie zu liegen. Was viele als Stigma werten und auf die sozialen Verhältnisse zurückführen, beurteilt die Forschung vorsichtiger. Denn offenbar machen es erbliche genetische Komponenten manchen Menschen schwer, mit Alkohol angemessen umzugehen.

Im Zuge immer besserer Verfahren zur Analyse von Genfunktionen gelingt es zunehmend, auch zu den biologischen Wurzeln von komplexen medizinischen Störungen vorzudringen, einschließlich genetischen Hintergründen bei Stoffmissbrauch und Sucht. Genetiker können heute Erbanlagen aufspüren, die körperliche Prozesse stark – oder auch nur leicht – beeinflussen und entsprechend ein Erkrankungsrisiko erhöhen. Dazu vergleichen sie Vererbungsmuster bei großen Bevölkerungsgruppen, wobei sie auf Hunderttausende genetischer Varianten im Genom jedes dieser Menschen achten.

Wie für viele Krankheiten gilt auch für Alkoholismus, dass er mehr als eine Ursache hat. Zudem tragen Gene keineswegs allein die Schuld. Trotzdem wirken sie oft auf eine vertrackte Entwicklung hin: Bestimmte Erbfaktoren können offenbar Wechselwirkungen von Regelkreisen in Körper und Gehirn sowie deren Zusammenspiel mit der Lebenssituation derart beeinflussen, dass mancher mehr gefährdet ist, mancher weniger. Es fällt nicht leicht, die verschiedenen Einflüsse zu trennen. Bisher kennen wir ein knappes Dutzend Gene, die das Alkoholismusrisiko steigern. Es dürfte aber noch einige mehr geben.

Genauer gesagt handelt es sich bei den bisher untersuchten Genen um Varianten von regulären Erbanlagen. Etliche davon sind in der Bevölkerung durchaus verbreitet. Obwohl die einzelne Abweichung das Alkoholismusrisiko an sich nur mäßig erhöht, können solche Erbfaktoren die Trinkgewohnheiten doch stark beeinflussen. Unter Umständen tragen sie auch zu anderen Süchten mit bei, und sie können mit im Spiel sein, wenn jemand zu regelverletzendem Verhalten, Depressionen oder Angstkrankheiten neigt. Wenn wir erst wissen, welche biologischen Vorgänge eine Trunksucht herbeiführen können, wird das fast mit Sicherheit auch erlauben, die bekannten Therapien gezielter einzusetzen und neue, auf den Einzelnen zugeschnittene Behandlungen zu entwerfen.

Klassische Erbabweichung

Unsere Gene kodieren für gut und gern 100 000 verschiedene Proteine, die im Körper physiologische Aufgaben erfüllen oder zur Regulation von Genen dienen. Gleich die erste Erbanlage, deren Einfluss auf Alkoholismus die Forscher entdeckten, zeigt eindrücklich, wie stark sich Varianten eines Gens auf physiologische Vorgänge auswirken können.

Viele Ostasiaten bekommen schon bei mäßigem Alkoholkonsum einen roten Kopf, Herzrasen und Kopfschmerzen, und ihnen wird schlecht. Schuld ist das Alkoholabbauprodukt Acetaldehyd, das sich in ihrem Blut anreichert, statt schnell weiter abgebaut zu werden. Hierfür wäre das Enzym Aldehyddehydrogenase zuständig. Wie Forscher in den 1980er Jahren erkannten, arbeitet dieses Enzym bei Betroffenen langsamer als bei anderen Menschen. Das liegt daran, dass diese Personen eine bestimmte Variante des dafür kodierenden Gens besitzen, bezeichnet als *ALDH2*, und deswegen ein verändertes Enzym bilden.

Diese Genvariante kommt bei Europäern eher selten vor, jedoch bei 53 Prozent der Vietnamesen, 44 Prozent der Japaner, 30 Prozent der Chinesen (unter Han-Chinesen sogar 45 Prozent) und 27 Prozent der Koreaner. Ein günstiger Nebeneffekt: Mit dieser Variante be-

In Kürze

- So komplex die Krankheit Alkoholismus ist – die **genetische Veranlagung** wirkt dabei mit. Offenbar können verschiedene Gene die Gefahr für Alkoholsucht erhöhen.
- Bei Alkoholikern und ihren Kindern kommen **physiologische Merkmale** vor – etwa charakteristische Hirnaktivitätsmuster –, die das Suchtrisiko erhöhen. Anhand solcher »Endophänotypen« (inneren Phänotypen) machen Forscher Genvarianten ausfindig, die sich darauf auswirken, wie jemand auf Alkohol anspricht.
- Aus solchen Erkenntnissen versprechen sich Mediziner Einblick in die **Entstehungsmechanismen von Alkoholsucht** und anderen Suchtkrankheiten sowie Ideen für verbesserte Therapiekonzepte und Vorsorge.

ALKOHOLKRANKHEIT

gleichbedeutend: Alkoholismus, Trunksucht, chronischer Alkoholmissbrauch

Betroffene erkennen ihre Erkrankung oft lange selbst nicht, da sie noch »funktionieren«

- Hinweise unter anderem:
- Entzugssymptome
- Konsum trotz negativer sozialer und gesundheitlicher Folgen
- starker Wunsch zu Trinken
- geringe Kontrollfähigkeit über Konsum
- Alkoholtoleranz nimmt zu
- Konsum wird immer mehr zum Mittelpunkt

»ENDOPHÄNOTYP« – INNERER PHÄNOTYP

Der Endophänotyp ist das individuelle körperliche Aktions- und Reaktionsmuster beispielsweise der Gehirnaktivität

Phänotyp: körperliches Erscheinungsbild – im Gegensatz zum **Genotyp:** Erbmuster eines Individuums

trägt das Risiko für Alkoholsucht nur bis zu einem Sechstel des Risikos von Menschen mit dem schnell arbeitenden Enzym.

Später untersuchten Forscher, ob andere Enzyme des Alkoholabbaus ähnliche Effekte erzeugen. Den ersten Abbauschritt – vom Alkoholmolekül zum Acetaldehyd – vollzieht die Alkoholdehydrogenase (ADH). Dieses Enzym wird von einer ganzen Genfamilie produziert, wobei jedes Gen andere seiner Eigenschaften beeinflusst. Am wichtigsten für den Alkoholstoffwechsel sind *ADH1* und *ADH4*. Nach unseren eigenen Studien verstärken bei Amerikanern europäischer Herkunft offenbar insbesondere Varianten von *ADH4* das Alkoholismusrisiko. Der molekulare Hintergrund ist allerdings noch nicht genau bekannt.

Die genetischen Hintergründe von Trunksucht dürften recht komplex sein. Allem Anschein nach können eine Reihe Gene mitwirken. Deren Wechselwirkungen untereinander sowie mit der Umwelt eines Menschen gilt es zu verstehen, um wirklich erklären zu können, wie und warum die Krankheit auftritt. Auch Menschen sind sehr verschieden. Besonders in Frühstadien äußern sich Alkoholprobleme ganz unterschiedlich. Erst die späteren Phasen wirken einheitlicher. Das fordert bei wissenschaftlichen Studien über physiologische Begleitmuster genaue Begriffsunterscheidungen. Zum Beispiel müssen Forscher Missbrauch und echte Abhängigkeit – Sucht – auseinanderhalten.

Medizinisch ist eine Sucht schwerwiegender. Kriterien dafür sind unter anderem – wie auch bei anderen Suchtkrankheiten –, dass der Patient große Mengen Alkohol verträgt, bei Enthaltsamkeit Entzugserscheinungen bekommt, die Kontrolle über den Konsum verliert, verschiedentlich versucht, ihn aufzugeben oder einzuschränken, viel Zeit für die Droge aufwendet, andere Tätigkeiten aufgibt und trotz körperlicher oder psychischer Probleme wegen des Alkohols nicht darauf verzichtet. Als abhängig gelten nach einem gebräuchlichen Schema Menschen, auf die in den letzten zwölf Monaten wenigstens drei dieser Kriterien zutrafen. Viele Personen, die hierunter fallen, haben mehrere Alkoholiker in der Familie. Solche Menschen wurden von uns und unseren Kollegen angesprochen und um ihre Mitwirkung bei genetischen Studien gebeten.

Besonders interessieren dabei physiologische Merkmale oder Erscheinungen, die man dem Betreffenden äußerlich nicht ansieht, die man aber messen und vergleichen kann. Wir sprechen vom inneren Phänotyp oder Endophänotyp. Wir möchten herausfinden, ob es Muster etwa im Zellstoffwechsel oder in der Zellkommunikation gibt, die bei Alkoholkranken gehäuft vorkommen und ein Risiko darstellen, leichter zum Alkoholiker zu werden. Dahinter steht die Vorstellung, dass der Endophänotyp biologische Ursachen einer Krankheit klarer erkennen lässt als Verhaltenssymptome, weil grundlegende physiologische Prozesse den Genen sozusagen näherstehen. Für Schizophrenie haben Psychiater eine solche Vorgehensweise schon in den 1970er Jahren vorgeschlagen. Mit den heutigen Werkzeugen für molekulare und vor allem auch genetische Analysen bringt der Ansatz noch mehr Aufschluss.

Persönliche Hirnmuster

Als Endophänotyp kann man auch die individuellen Muster der Hirnaktivität bezeichnen, wie sie etwa im EEG (Elektroenzephalogramm) erscheinen. Jeder von uns liefert sozusagen einen individuellen neurologischen Fingerabdruck: Das Gehirn jedes Menschen arbeitet und reagiert auf Reize im Detail ein wenig anders und erbringt darum im EEG etwas andere Wellen und Spitzenausschläge. Aus welchen Hirngebieten die einzelnen Signale vermutlich stammen, lässt sich mit Computeralgorithmen berechnen. Auch können – für unsere Betrachtungen besonders wichtig – die Erregungsmuster widerspiegeln, wie es allgemein um das Gleichgewicht zwischen erregenden und hemmenden neuronalen Prozessen bestellt ist, das heißt, wie stark Reaktionen von Nervenzellen und Aktivitäten von neuronalen Schaltkreisen angestachelt beziehungsweise gedämpft werden.

Jene elektrophysiologischen Muster sind in hohem Maß erblich. Auch sehen sie bei Alkoholikern in charakteristischer Weise anders aus als bei Nichtalkoholikern. Bei Alkoholikern überwiegen erregende Prozesse die hemmenden und bezwingen dämpfende Einflüsse sogar. Ein solches Ungleichgewicht – Hirnforscher sprechen von Enthemmung – tritt auch bei Kindern von Alkoholikern auf. Es ist ein starkes Vorzeichen dafür, dass sie später selbst mehr als andere zum Alkoholmissbrauch und zur Abhängigkeit neigen werden. Wir deuten diese typischen Hirnmuster als Kennzeichen einer erblichen Disposition.

Das Phänomen lässt sogar die Schwachstelle oder besser die Fehlfunktion im Gehirn vermuten: Hirnforscher nehmen an, dass die Enthemmung stark hervortritt, weil in einigen Hirnregionen nicht genügend funktionsfähige Hemmneuronen existieren – und zwar in Gebieten, die für Urteilen und Entscheiden zuständig sind. Wem es an solchen hemmenden Schaltkreisen mangelt, der könnte – so die Annahme – leichter dazu tendieren, Impulsen aus tieferen Hirnbereichen nachzugeben, etwa aus dem für Gefühle wichtigen Mandelkern (der Amygdala).

Die 1980er Jahre lieferten eine Reihe Befunde zur erhöhten Alkoholsuchtgefahr bei bestimmten Hirnerregungsmustern. Daraufhin überlegten Forscher, ob sie auch genetische Hintergründe aufdecken könnten. Das war der Beginn der amerikanischen Forschungsinitiative Coga, die ihre Arbeit 1989 aufnahm. Auch wir gehören dieser Wissenschaftsvereinigung an. Heute wirken bei dem Großprojekt acht US-Forschungszentren mit sowie tausende Alkoholiker mit ihren Angehörigen.

Als die Coga-Studien begannen, suchten beteiligte Forscher USA-weit von Alkoholismus erheblich betroffene Familien. Dass die Neigung zu dieser Sucht offenbar stark erblich ist, ließen Untersuchungen an Zwillingen, Adoptierten und Familien längst vermuten. Hiernach tragen Gene zum Gesamtrisiko für die Krankheit zu über 50 Prozent bei. Zu erwarten war darum, dass in betroffenen Familien irgendwelche physischen Merkmale öfter vorkommen als in anderen. Nach denen müsste man suchen und dann schauen, ob sich eine Verbindung zu auffälligen Erbfaktoren ergibt (siehe Kasten unten).

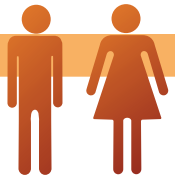
Coga-Forscher befragten über 11 000 Personen eingehend: Rund 1200 Alkoholkranke, die sich einer Therapie unterzogen, und deren Angehörige. So fanden sich 262 von Alkoholismus »stark betroffene« Familien. Das heißt, noch mindestens zwei Verwandte ersten Grades des Patienten – wie Eltern, Geschwister – waren auch alkoholabhängig. Von allen Verwandten wurde der elektrophysiologische Phänotyp des Gehirns bestimmt. Auch fragten die Forscher alle Mitwirkenden nach Eigenschaften, Reaktionen und Verhaltensmustern, die mutmaßlich im Zusammenhang mit der Erkrankungsgefahr stehen und nach heutiger Kenntnis genetisch beeinflusst sein könnten. Dazu gehörte, ob jemand erst bei größeren Alkoholmengen eine Wirkung verspürt oder ob er schon eine relativ schwere Depression durchgemacht hat. Gefragt wurde auch nach Mustern in der Geschichte des Konsums, etwa nach der Höchstmenge an Drinks im Lauf eines Tages.

Zudem nahmen die Wissenschaftler Proben vom Erbgut aller Teilnehmer. Sie durchmusterten die Chromosomen zunächst nach charakteristischen Abschnitten, die nur bei einem Teil der Beteiligten vorkommen. Solche spezifischen Bereiche auf Chromosomen mit besonderen molekularen Kennzeichen eignen sich oft als so genannte Marker – Erkennungsstrukturen – für möglicherweise aufschlussreiche genetische Regionen. Dort können entscheidende Gene liegen. Falls in einer Familie

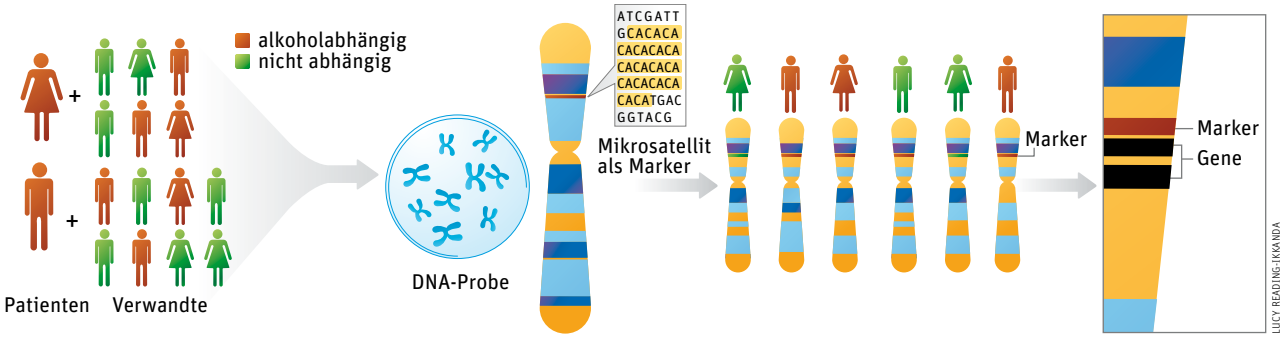
WAS IST COGA?

Coga: »**Collaborative study on the genetics of alcoholism**«: Forschervereinigung, deren Mitglieder genetische Hintergründe von Alkoholsucht ergründen; derzeit wirken acht Forschungszentren der USA mit sowie Tausende von Alkoholikern und deren Angehörige. Coga wird vom amerikanischen Nationalen Institut für Alkoholmissbrauch und Alkoholismus in Bethesda (Maryland) unterstützt.

FAMILIENSTUDIEN ZUR GENSUCHE



Um zu erkennen, welche Gene Krankheiten mit komplexem Hintergrund beeinflussen, führen Forscher zunächst so genannte Kopplungsanalysen durch. Sie suchen auf den Chromosomen von verwandten Personen nach Abschnitten – »Marker« genannt –, die bei vielen Betroffenen vorkommen, aber nur bei wenigen nicht erkrankten Familienmitgliedern. Dort könnten entsprechende Gene sitzen, die das Alkoholismusrisiko erhöhen.



Teilnehmer
therapiewillige Alkoholabhängige und deren Angehörige

Durchmustern der Chromosomen nach Unterschieden
Als Marker können Mikrosatelliten dienen: Abschnitte, auf denen sich eine kurze Basenfolge unterschiedlich oft wiederholt; hier erscheint die Folge Cytosin-Adenin 17-mal, bei einigen Verwandten aber nur 12-mal.

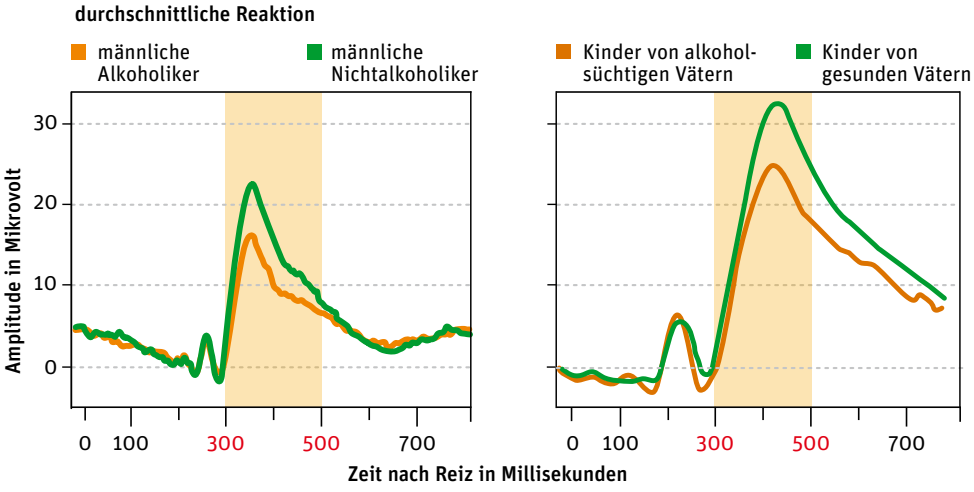
Kopplungsanalyse
Haben den Marker überwiegend nur die alkoholkranken Familienmitglieder, besteht der Verdacht, dass diese Region mit der Sucht in Zusammenhang steht.

Gene aufspüren
Eine genauere Kartierung der verdächtigen DNA-Region führt zu Genen, deren möglicher Einfluss dann untersucht wird.

Hirnreaktion vermeldet Risiko

Individuelle physiologische Merkmale bewirken persönliche Muster elektrischer Hirnaktivität. Es gibt bestimmte solche »Endophänotypen«, die ein erhöhtes Alkoholismusrisiko mit sich bringen.

Verräterische P300-Zacke
Im EEG erscheint 300 bis 500 Millisekunden nach einem Reiz (etwa einem Lichtblitz) ein Ausschlag. Bei Alkoholikern – selbst wenn sie nicht mehr trinken – ist diese P300-Welle in der Regel kleiner als bei nicht Abhängigen (links). Sogar bei Kindern von Alkoholikern ist der Ausschlag niedriger als bei anderen Kindern.



GRAFIK RECHTS (KINDER): LUCY READING-IKKANDA, NACH: BERENICE PORJESZ UND HENRI BEGLEITER, EVENT-RELATED POTENTIALS IN COA'S, IN: ALCOHOL HEALTH & RESEARCH WORLD 1997, BD. 21, NR. 3

Der Rezeptor für Gaba, den **wichtigsten hemmenden Botenstoff** im Gehirn, funktioniert unzureichend

ein bestimmter Marker überwiegend bei jenen Mitgliedern vorkommt, die Anzeichen für Alkoholismus zeigen, dann besteht Verdacht auf einen Zusammenhang mit der Suchtgefährdung. Durch solche Vergleiche zwischen betroffenen und gesunden Familienmitgliedern wurden die Forscher auf einige Abschnitte auf den Chromosomen 1, 2, 4 und 7 aufmerksam. Bis sich dort schließlich einige Gene dingfest machen ließen, dauerte es dann noch Jahre. Darunter waren die Gene *ADH4* und *GABRA2* auf Chromosom 4 sowie *CHMR2* auf Chromosom 7. Dass diese Erbgutabschnitte und Gene auf Alkoholismus wohl wirklich Einfluss nehmen können, bekräftigen ähnliche Ergebnisse anderer Forscherteams, die ihre Daten von anderen Teilnehmergruppen gewannen.

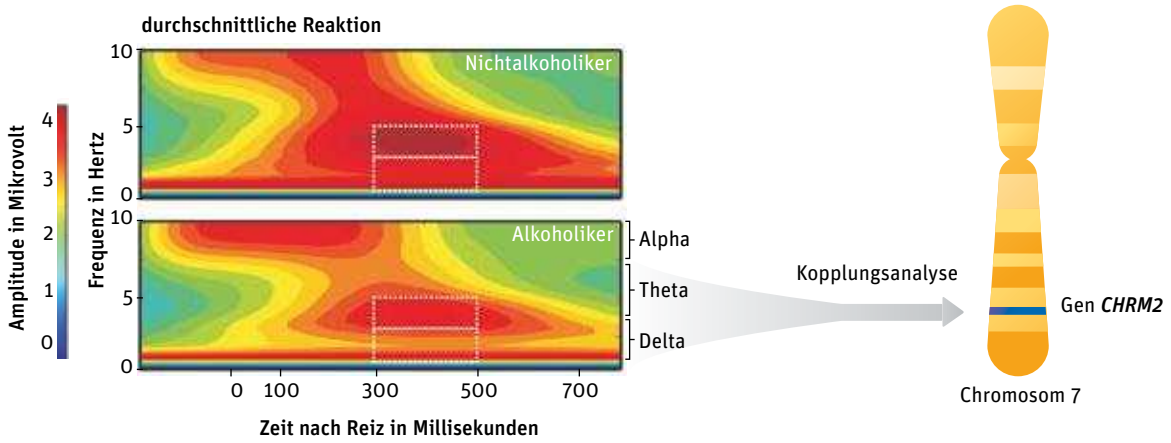
Für viele Hirnfunktionen ist der Botenstoff Gaba (Gamma-Aminobuttersäure) wichtig, der Nervenzellreaktionen dämpft oder hemmt. Die Zelloberflächen tragen passende Andockstellen, so genannte Rezeptoren. Immer mehr spricht dafür, dass die Alkoholismusanfälligkeit bei einigen Genvarianten dieser Rezeptoren höher ist als bei anderen. Nun handelt es sich bei Gaba um den häufigsten und wohl wichtigsten hemmenden neuronalen Botenstoff – Neurotransmitter – im Nervensystem von Säugetieren.

Bei der Rezeptorklasse $Gaba_A$ gruppieren sich Proteinuntereinheiten um einen Ionenkanal für Chlorid-Ionen. Das Gen für eine verdächtige Untereinheit heißt *GABRA2*. Varianten dieses Gens beeinflussen maßgeblich die so genannte Beta-Aktivität im EEG eines Menschen, die oft als Zeichen von Ruhe und Entspannung gilt. Bei einem bestimmten Beta-Endophänotyp scheint jedoch die Enthemmung höher als sonst zu sein.

Ungezügeltes Temperament

Die Neuronen der vorderen Hirnrinde weisen besonders viele Gaba-Rezeptoren auf. Bekommen diese Zellen allgemein zu wenig Hemmsignale, können bedingt durch Übererregung Krampfanfälle auftreten. Medikamente gegen solche Anfälle unterstützen gewöhnlich die Gaba-Aktivität, das heißt sie fördern die neuronale Hemmung. Forscher vermuten, dass sich auch ein leichterer Ausfall der Gaba-Hemmung ungünstig bemerkbar machen kann, und zwar durch übersteigert impulsives Verhalten, durch schlechte Impulskontrolle. Dieses Erscheinungsbild begleitet eine Reihe von psychischen Erkrankungen, etwa manisch-depressive Störungen, Missbrauch von Suchtstoffen oder chronisch regelverletzendes Verhalten. In Coga-Studien kam heraus, dass tatsächlich manche Varianten des *GABRA2*-Gens mit Alkoholismus gekoppelt auftreten, was sich später mehrfach bestätigte. Interessanterweise sieht dann der $Gaba_A$-Rezeptor selbst nicht anders aus. Vielmehr scheint von der betreffenden Proteinuntereinheit weniger gebildet zu werden als sonst. Vielleicht entstehen so einfach nicht genügend funktionsfähige Rezeptoren.

Genaueres darüber, wie die Genvariante die Enthemmung des Gehirns steigern hilft, wird derzeit erforscht. Ein Zusammenhang mit Alkoholismus erscheint aber bereits plausibel. Zu impulsives Verhalten ist für viele Alkoholkranke typisch – vor allem für Männer, die der



ALLE ÜBRIGEN GRAFIKEN: LUCY READING-IKKANDA, NACH: BERENICE PORJESZ ET AL.: THE UTILITY OF NEUROPHYSIOLOGICAL MARKERS IN THE STUDY OF ALCOHOLISM. IN: CLINICAL NEUROPHYSIOLOGY, MAI 2005, BD. 116, NR. 5; GENEHMIGT VON ELSEVIER

Hintergründe

Die P300-Welle resultiert wesentlich aus Hirnaktivität, die mit Bewusstheit und dem Treffen von Entscheidungen zu tun hat. Damit assoziierte Frequenzbänder im EEG erscheinen bei Alkoholikern schwächer ausgeprägt. Menschen dieses Typs neigen außerdem mehr zu Depressionen.

Genetische Spur

Alkoholiker mit verminderter P300-Reaktion scheinen Varianten eines Gens zu besitzen, das für einen Acetylcholinrezeptor kodiert. Dieser Neurotransmitter reguliert die Erregbarkeit von Nervenzellen.

Sucht früh verfallen. Viele aus dieser Gruppe neigen außerdem zu Regelverstößen und auch sonst dazu, ihr Temperament auszuleben, während sich Angstkranke und Depressive eher in sich selbst zurückziehen. Von daher ließe sich auch ohne genetische Untersuchung ein Suchtprofil des Alkoholismus aufstellen, bei dem die Therapie unter anderem beim Gaba-System ansetzen könnte.

Des Weiteren machte sich bei den Coga-Studien das Acetylcholin verdächtig, ebenfalls ein verbreiteter neuronaler Botenstoff im Gehirn. Die so genannten cholinergen Neuronen – die auf Acetylcholin ansprechen – nehmen gleichfalls auf das Gleichgewicht zwischen Erregung und Hemmung im Gehirn Einfluss. Bei unseren Studienteilnehmern stießen wir auf die Chromosomenregion, in der das Gen *CHRM2* liegt. Es kodiert für den so genannten muskarinischen Acetylcholinrezeptor M2. Wird dieser Rezeptor aktiviert, verändert das im EEG die langsamen Delta- und Theta-Wellen. Sie stehen für kognitive Funktionen wie Aufmerksamkeit und Treffen von Entscheidungen. Bei manchen Varianten des genannten Gens konnten wir eine Verbindung zu Alkoholabhängigkeit sowie zu schweren Depressionen erkennen. Auch hier ist offenbar nicht der Rezeptor selbst irgendwie defekt, sondern er wird nicht in richtiger Menge hergestellt.

Dieser Befund passt zu einer These, die der Psychiater David Janowsky und seine Kollegen von der Vanderbilt-Universität in Nashville (Tennessee) schon 1976 aufstellten. Sie wussten bereits, dass die Signalsteuerung des Gehirns fein ausbalanciert sein muss, damit es normal funktioniert. Womöglich, so vermuteten diese Forscher, sind Menschen mit zu empfindlichem muskarinischem Acetylcholinrezeptor für Depressionen und verwandte Störungen besonders anfällig.

Die nun aufgedeckte Beziehung zwischen dem *CHRM2*-Gen, Alkoholismus und Depression brachte erstmals einen Erbfaktor direkt mit solcher Überempfindlichkeit in Verbindung. Die Erkenntnis verspricht neue Ansatzpunkte für gezieltere medikamentöse Therapien speziell dieses klinischen Bilds. Vor allem beweist das Beispiel, dass wir dringend ergründen müssen, wie kleine physiologische Besonderheiten zur komplexen Erscheinung einer Sucht beitragen.

MEHR DAZU

- In Deutschland gibt es über **1,5 Millionen Alkoholabhängige** und zudem fast 2 Millionen Menschen, die gefährlichen Alkoholmissbrauch betreiben und bereits suchtgefährdet sind.
- Jeder dritte 15-Jährige und mindestens jeder zweite 17-Jährige hat schon einen **Alkoholrausch** erlebt.

Die Familienforschung über den Alkoholismus hat auch wieder einmal gezeigt, dass manche missliebigen Genvarianten in einigen ethnischen Gruppen häufiger vorkommen als in anderen (siehe auch Spektrum der Wissenschaft, 5/2005, S. 90 und 96). Das heißt nicht, bestimmte Ethnien seien generell anfälliger für Alkoholismus. Aber so wie insbesondere viele Ostasiaten wegen eines veränderten Abbauenzyms Alkohol erst gar nicht vertragen, so tauchen auch manche genetischen Risikofaktoren für Alkoholsucht bei einigen Menschengruppen öfter auf als bei anderen. Dem Therapeuten kann solches Wissen dabei helfen, im individuellen Fall den Krankheitshintergrund zu erkennen und eine angemessene Behandlung zu konzipieren.

Wie unsere Arbeitsgruppe kürzlich nachwies, betrifft das sogar einen Rezeptor zur Geschmackswahrnehmung, hTAS2R16. Eine Variante des Rezeptorgens ist zumindest bei den Teilnehmern unseres Projekts signifikant mit Alkoholismus gekoppelt. Träger der Variante schmecken viele Bitterstoffe nicht so stark. Amerikaner europäischer Herkunft sind selten betroffen, doch 45 Prozent der Afroamerikaner besitzen den Risikofaktor.

Die bisher gefundenen erblichen Einflüsse in Richtung Alkoholsucht erstrecken sich auf viele ganz verschiedene physiologische Aspekte. Als Beispiele haben wir den Alkoholstoffwechsel, Hirnaktivitätsmuster und das Geschmacksempfinden angeführt. Die einzelnen genannten Gene haben nur einen eher mäßigen Effekt. Sie mögen das Erkrankungsrisiko um jeweils vielleicht 20 bis 40 Prozent steigern. Die Forscher sind sich sicher, dass außerdem noch weitere Risikogene existieren.

Um die Tragweite der genetischen Befunde zu erkennen, muss man einerseits untersuchen, was verdächtige Erbvarianten wohl in jungen Jahren bewirken – bevor ein ausgeprägter Alkoholkonsum einsetzt –, andererseits, ob sie wirklich Voraussagen auf späteren Alkoholismus erlauben. Das Coga-Projekt führt hierzu an Kindern aus stark gefährdeten Familien eine Langzeitstudie durch. Nach ersten, noch vorläufigen Ergebnissen an Jugendlichen zum Alkoholabbauenzym ADH scheinen bei Risikovarianten des entsprechenden Gens verstärkt ein früher Alkoholkonsum und spätere Trinkprobleme aufzutreten. Dagegen neigen Jugendliche, die verdächtige Varianten von *CHRM2* besitzen, in dem Alter weniger zum Trinken als zu Depressionen. Auch bei Teenagern mit der Risikovariante von *GABRA2* steht Alkoholmissbrauch noch nicht im Vordergrund. Doch sie fallen nicht selten der Polizei auf. Viele sind

Gene mit Risikopotenzial

Eine Reihe individuell abweichender physiologischer Prozesse kann zum Alkoholismusrisiko beitragen. Hier eine Liste bisher in dem Zusammenhang erkannter Gene mit risikobehafteten – oder schützenden – Varianten. Das Spektrum reicht von Unterschieden im Alkoholabbau über die Balance von Hirnerregungsmustern bis hin zu Geschmacksempfinden und Mechanismen physiologischer Bestärkung. Manche dieser individuellen Züge dürften zugleich zu anderen Verhaltensauffälligkeiten oder Stimmungsschwankungen beitragen – ein Anzeichen für übergreifende Einflüsse.

Gen	Protein/Funktion	Wirkung der Genvariante	Beziehung zu anderen Merkmalen oder Krankheiten
ADH4, Chromosom 4	Alkoholdehydrogenase: Enzym, baut Alkohol ab	bei manchen Varianten erhöhtes Risiko	nicht vorhanden
ALDH2, Chromosom 12	Aldehyddehydrogenease: Enzym, baut Aldehyd ab	Schutz	nicht vorhanden
CHRM2, Chromosom 7	muskarinischer Acetylcholinrezeptor M2: steuert Nervenzellsignale	erhöhtes Risiko	Depression; im EEG andere Delta- und Theta-Aktivität
**DRD2*, Chromosom 11	Rezeptor für Dopamin D2: steuert belohnende Wirkung von Reizen	erhöhtes Risiko	Nikotinsucht
GABRG3, Chromosom 15	g3-Untereinheit des $Gaba_A$-Rezeptors: steuert Nervenzellsignale	erhöhtes Risiko	nicht vorhanden
GABRA2, Chromosom 4	a2-Untereinheit des $Gaba_A$-Rezeptors: steuert Nervenzellsignale	erhöhtes Risiko	Drogensucht; Regelverstöße; im EEG andere Beta-Aktivität
HTAS2R16, Chromosom 7	hTAS2R16-Rezeptor; Wahrnehmung bitteren Geschmacks	erhöhtes Risiko	nicht vorhanden
OPRK1, Chromosom 8 *PDYN*, Chromosom 20	Kappa-Opioidrezeptor und das Peptid Prodynorphin, das daran bindet; beteiligt an der Steuerung von Abneigungen und Belohnung	erhöhtes Risiko	andere Stressreaktionsmuster; vielleicht wichtig bei Heroin- und Kokainsucht

* widersprüchliche Befunde

CORBIS, SCOTT GIBSON

So manches Alkoholikerschicksal ließe sich nach Meinung der Autoren verhindern, wenn jeder früh genug um sein persönliches Risiko wüsste.

aggressiv, und so mancher fliegt von der Schule. Bei jungen Erwachsenen lässt sich allerdings bereits ein Zusammenhang jener Erbvariante mit Alkoholabhängigkeit nachweisen.

Solche Befunde unterstreichen, wie unterschiedlich der Weg zum Alkoholismus verlaufen kann, auch was physiologische Hintergründe betrifft. Risikovarianten von *ADH* können ihn direkt bahnen helfen, weil sie einem starken Alkoholkonsum Vorschub leisten. Dagegen bedeuten *GABRA2*-Varianten zunächst eine erhöhte Anfälligkeit für Verhaltensverstöße. Der Weg im Fall von *CHRM2* führt anfangs wohl eher über Depressionen und andere psychische Schwierigkeiten dieser Art.

Kein unbezwingbares Schicksal

Vermutlich werden bald mehr bedenkliche Gene erkannt werden. Hiervon dürfen wir uns versprechen, nicht nur das Risiko des Einzelnen immer besser abschätzen, sondern auch vorsorglich und therapeutisch gezielter vorgehen zu können, also individuell genauer abgestimmte Behandlungen zu konzipieren. Bei verschiedensten Erkrankungen mit komplexen Ursachen, ob Bluthochdruck, Krebs oder manischer Depression, beziehen Ärzte gewöhnlich bereits das genetische Profil mit ein. Die Alkoholismustherapie steht da noch ganz am Anfang.

Möglicherweise können die genetischen Befunde zum Alkoholismus sogar bei der Prävention und Therapie von anderen Suchtformen weiterhelfen. In Alkoholikerfamilien kommt offenbar überdurchschnittlich häufig auch Nikotinsucht oder selbst Abhängigkeit von harten Drogen vor. Auch scheinen recht oft Gemüts- und Angstkrankheiten aufzutreten. Wie am Beispiel der genetischen Variante sichtbar wird, die Alkoholismus wie Depressionen fördern kann, haben die verschiedenen Leiden und Neigungen zu Drogen unter Umständen teilweise eine gemeinsame Ursache.

Trotzdem besiegeln solche Gene nicht unser Schicksal. Sicher sind manche von uns schon allein wegen ihrer Veranlagung in größerer Gefahr für Alkoholmissbrauch und dessen mögliche Folgen als andere. Kommen etwa bei einem genetischen Risikoprofil traumatische Kindheitserlebnisse hinzu, entwickeln sich derartige Probleme allzu leicht. Nur – niemand wird zum Alkoholiker, wenn er nicht selbst in manchen Situationen eine schlechte Entscheidung getroffen hat. Selbst ein zu 50 Prozent erbliches Suchtrisiko bedeutet, dass es immerhin zur Hälfte anders zu Stande kommt.

Es gibt auch kritische Stimmen, dass viel Geld in genetische Studien über Alkoholismus, Nikotinsucht und andere Süchte gesteckt wird. Manche halten es hinsichtlich der Allgemeingesundheit für günstiger und sinnvoller, mit diesen Mitteln den Konsum von potenziellen Suchtstoffen weit greifend zurückzudrängen. Ihr Argument: Identifiziert man mit genetischen Erhebungen diejenigen, die auf Grund ihres Erbprofils von breit angelegten Suchtbekämpfungstrategien am meisten profitieren würden, besteht die Gefahr, solche Menschen zu stigmatisieren. Natürlich wäre es zu begrüßen, wenn der Gebrauch von Suchtmitteln aller Art abnähme. Doch wir sind auch überzeugt davon, dass es vielen für Alkohol empfänglichen Menschen zugutekommt, wenn sie um ihre Konstitution wissen, sich Rat holen und sich dann in Acht nehmen können. Zu wünschen wäre, dass diese Haltung in der Gesellschaft einen hohen Stellenwert bekäme.

Die Nachfrage nach individuellen genetischen Analysen wird wachsen. So genannte Genchips erkennen nicht nur Varianten, sondern auch Aktivitäten von Genen. Das erlaubt eine Reihe von Empfehlungen zum Verhalten, zu Medikamenten und psychiatrischer Behandlung, über deren Befolgung der Einzelne dann selbst entscheidet. Freiheit hierin ist sicherlich ein unabdingbarer Aspekt, gerade in kapitalistischen Ländern, wo Wissenschaft von Markt und Wettbewerb vorangetrieben wird. Darum ist die Akademikergemeinschaft gehalten, die Entscheidungsfindung zu begleiten. Sie muss aufzeigen, was echte physiologische Zusammenhänge sind und was falsche Behauptungen, und sie muss einen verantwortungsvollen Umgang mit den wissenschaftlichen Erkenntnissen einfordern. ◁

John I. Nurnberger jr., hat an der Medizinischen Fakultät der Indiana-Universität in Indianapolis eine Professur für Psychiatrie und ist Direktor des dortigen Instituts für psychiatrische Forschung. **Laura Jean Bierut** ist an der Washington-Universität in St. Louis (Missouri) Professorin für Psychiatrie.
Die Autoren danken Henri Begleiter und Theodore Reich, beide verstorbene führende Mitarbeiter der Coga-Forschungsvereinigung, für ihre Initiative und wichtigen Beiträge betreffs der Vereinigung. Auch Nurnberger und Bierut sind Mitglieder von Coga.

Endophenotypes successfully lead to gene identification: Results from the collaborative study on the genetics of alcoholism. Von Danielle M. Dick et al. in: Behavior Genetics, Bd. 36, Heft 1, S. 112, Jan. 2006

The collaborative study on the genetics of alcoholism: An update. Von Howard J. Edenberg in: Alcohol Research & Health, Bd. 26, Heft 3, S. 214, 2002

Forschung für Essen und Trinken. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 4/2004: Kleine Kulturgeschichte des Alkohols, S. 54; Alkohol – das unterschätzte Gift, S. 66; Alkohol fürs Herz, S. 76

Medikamente und Alkohol. Spektrum der Wissenschaft, Spezial 6: Pharmaforschung, S. 80

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/910599.

Mit einfachen Bluttests auf Antikörper werden Ärzte eines Tages im Voraus feststellen, ob dem Patienten ein Autoimmunleiden droht.

IHR WUNSCHARTIKEL: 1. Platz der fünften Runde
spektrum.de/wunschartikel

RISIKOPROGNOSEN DER NEUEN ART

Bei Diabetes, rheumatoider Arthritis oder multipler Sklerose können Mediziner im Blut Vorboten nachweisen – oft schon Jahre vor dem Ausbruch der Erkrankung. Dieser lässt sich so vielleicht künftig verzögern oder gar verhindern.

FOTO: CARY WOLINSKY; BEARBEITUNG: JEN CHRISTIANSEN

Von Abner Louis Notkins

Als Anne schließlich einen Neurologen aufsucht, stellt der eine multiple Sklerose fest. Es fing damit an, dass die Frau einen Tages in der rechten Hand keinen Stift mehr halten konnte. Wochen später zog der rechte Fuß beim Gehen nach. Die Symptome verschlimmerten sich in den folgenden Monaten.

Multiple Sklerose gehört zu den so genannten Autoimmunkrankheiten. Fälschlicherweise greift das Immunsystem körpereigenes Gewebe an, bei dieser Erkrankung die Hüllen um lange Nervenfasern.

Über 40 verschiedene Autoimmunerkrankungen, in manchen Aufstellungen noch deutlich mehr, sind heute bekannt. An multipler Sklerose leiden in Deutschland etwa 120 000 Menschen, an Typ-1-Diabetes – der so genannten juvenilen Zuckerkrankheit, bei der die Insulinzellen der Bauchspeicheldrüse zerstört sind – einige hunderttausend. Zu den bekannteren und häufigen dieser Krankheiten zählen unter anderem auch die rheumatoide Arthritis oder chronische Polyarthritis und die Zöliakie, bei der schwere Darmentzündungen auftreten. Unter den Krankheits- und Todesursachen stehen die Autoimmunleiden nach den Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Krebs an dritter Stelle. Sie dürften fünf bis acht Prozent der Bevölkerung treffen – und verursachen hohe Gesundheitskosten.

Neuere wissenschaftliche Befunde lassen hoffen, dass sich diese Situation in absehbarer Zeit verbessert. Denn offenbar bildet der Körper bestimmte gegen eigene Strukturen gerichtete Antikörper, so genannte Autoantikörper, oft schon Jahre, bevor klinische Symptome auftreten. Diese Erkenntnis, die sich im vergangenen Jahrzehnt zunehmend erhärtete, veranlasst zum Umdenken: Eine Autoimmunkrankheit mag zwar plötzlich ausbrechen, doch sie dürfte sich lange angebahnt haben. Vielleicht werden Ärzte zukünftig Blutproben gesunder Patienten auf verdächtige Autoantikörper prüfen lassen und dann gezielt Vorsorge treffen, damit die Erkrankung erst gar nicht oder wenigstens verzögert in Erscheinung tritt.

Allerdings müsste die Behandlung wohl jeweils ganz spezifisch auf die drohende Krankheit zugeschnitten sein, und da steht die Forschung noch vor vielen Hürden. Sofern die Autoantikörper selbst zur Krankheit beitragen – wie bei der Myasthenia gravis, einer durch Störung der Muskelerregung be-

In Kürze

- Bei **Autoimmunkrankheiten** wie dem juvenilen Diabetes bildet das Immunsystem fälschlich Antikörper, die sich gegen körpereigenes Gewebe richten.
- Manche der **Autoantikörper** erscheinen Jahre vor den ersten Krankheitssymptomen. Das lässt hoffen, anhand dieser Immunproteine Personen mit einem Erkrankungsrisiko früh zu erkennen.
- Über Autoantikörper ließe sich vielleicht auch der Verlauf der Immunkrankheit prognostizieren. Solche Moleküle könnten sogar bestimmte andere **Krankheitsrisiken** anzeigen, etwa für Krebs oder Arteriosklerose.
- Voraussichtlich wird das Bestimmen von Autoantikörpern eines Tages in **Gesundheitschecks** Routine sein.

dingten Muskelschwäche –, könnte es helfen, die verheerenden Immunmoleküle abzublocken, was noch relativ einfach wäre. In anderen Fällen richten wahrscheinlich hauptsächlich andere Immunkomponenten den eigentlichen Schaden an, etwa T-Lymphozyten und Makrophagen. Dann müsste man die angreifenden Immunzellen gezielt bekämpfen.

Bis zu der erhofften medizinischen Revolution wird es noch einige Zeit dauern – also bis Ärzte Autoimmunkrankheiten im Vorfeld mit Routinetests erkennen und vorbeugend behandeln können, vielleicht ähnlich leicht und preisgünstig, wie sie heute Cholesterinwerte bestimmen. Zwar haben Forscher schon eine Anzahl Autoantikörper ausgemacht, doch bisher existieren erst wenige große Studien dazu, wie genau sie anzeigen, dass die betreffende Krankheit bevorsteht.

Im Zeitalter der Genomik mag sich mancher wundern, warum man heutzutage überhaupt noch Tests auf Antikörper wünscht. Täte es nicht ein Durchmustern des Genoms auf Risikogene ebenso gut? Schließlich dürfte es dafür bald breit einsetzbare Verfahren geben. Leider entstehen aber die meisten chronischen Krankheiten in einem komplexen Zusammenspiel von vielen Erbfaktoren und Umwelteinflüssen. Das einzelne Gen leistet dann nur einen geringen Beitrag. An ihm lässt sich kaum ablesen, ob ein Mensch jemals erkranken wird und wann damit zu rechnen ist. Finden sich in seinem Blut aber spezifische Autoantikörper, wäre das vermutlich oft ein Signal, dass im Körper schon ein Prozess eingesetzt hat, der mit einiger Wahrscheinlichkeit auf die Krankheit zuführt. Genanalysen mögen in dem Zusammenhang unter Umständen helfen, zunächst einmal einzugrenzen, wer überhaupt eine erbliche Disposition für eine Autoimmunkrankheit besitzt und genauer auf verdächtige Antikörper untersucht werden sollte.

Von Typ-1-Diabetikern stammten die ersten Anhaltspunkte, dass Autoantikörper ein drohendes Autoimmunleiden ankündigen könnten. Typischerweise bricht diese Form der Zuckerkrankheit in jungen Jahren aus, oft schon in der Kindheit oder Jugend. Das Immunsystem zerstört die so genannten Beta-Zellen der Bauchspeicheldrüse (siehe Kasten rechts). Sie müssen das lebenswichtige Hormon Insulin bilden, welches dafür sorgt, dass die Körperzellen aus dem Blut Glukose (Traubenzucker) aufnehmen, die ihnen Energie liefert. Ohne Insulin verhungern die Zellen, und der Blutzuckerspiegel steigt gefährlich an.

Warum die Beta-Zellen zu Grunde gehen – dass der Typ-1-Diabetes eine Autoimmunerkrankung ist –, stellte sich erst vor 30 Jahren heraus. In den 1970er Jahren fand Willy Gepts von der Vrije Universiteit Brussel in Bauchspeicheldrüsen von an Diabetes gestorbenen Kindern einen Hinweis darauf, dass Immunattacken schuld sind: Die Langerhans-Inseln, in denen sonst die Beta-Zellen liegen, waren bei diesen Kindern von Lymphozyten überschwemmt. Bald darauf wies Franco Bottazzo von der Middlesex-Klinik in London nach, dass das Blut von Typ-1-Diabetikern auf Inselzellgewebe immunologisch reagiert, nicht aber das Blut von nicht zuckerkranken Menschen (Bild S. 76). Doch welche Moleküle der Beta-Zellen greift das Immunsystem an? Was sind die Zielkomponenten der Selbstzerstörung – die Autoantigene? Eine intensive Suche setzte ein. Von deren Kenntnis versprachen sich die Mediziner Aufklärung über das Entstehen von juvenilem Diabetes.

In der Hauptsache drei Autoantigene – alle drei Proteine – erkannte die Forschung der letzten beiden Jahrzehnte bei Menschen mit einer frischen Diagnose von Typ-1-Diabetes: erstens das Hormon Insulin selbst, zweitens das Enzym GAD (Glutaminsäure-Decarboxylase), drittens ein Protein, das meine Arbeitsgruppe aufspürte und das wir IA-2 (Inselzellantigen-2) nennen. Es handelt sich um eine Tyrosinphosphatase der winzigen Säckchen (Vesikel), die dem Insulintransport innerhalb von Beta-Zellen dienen.

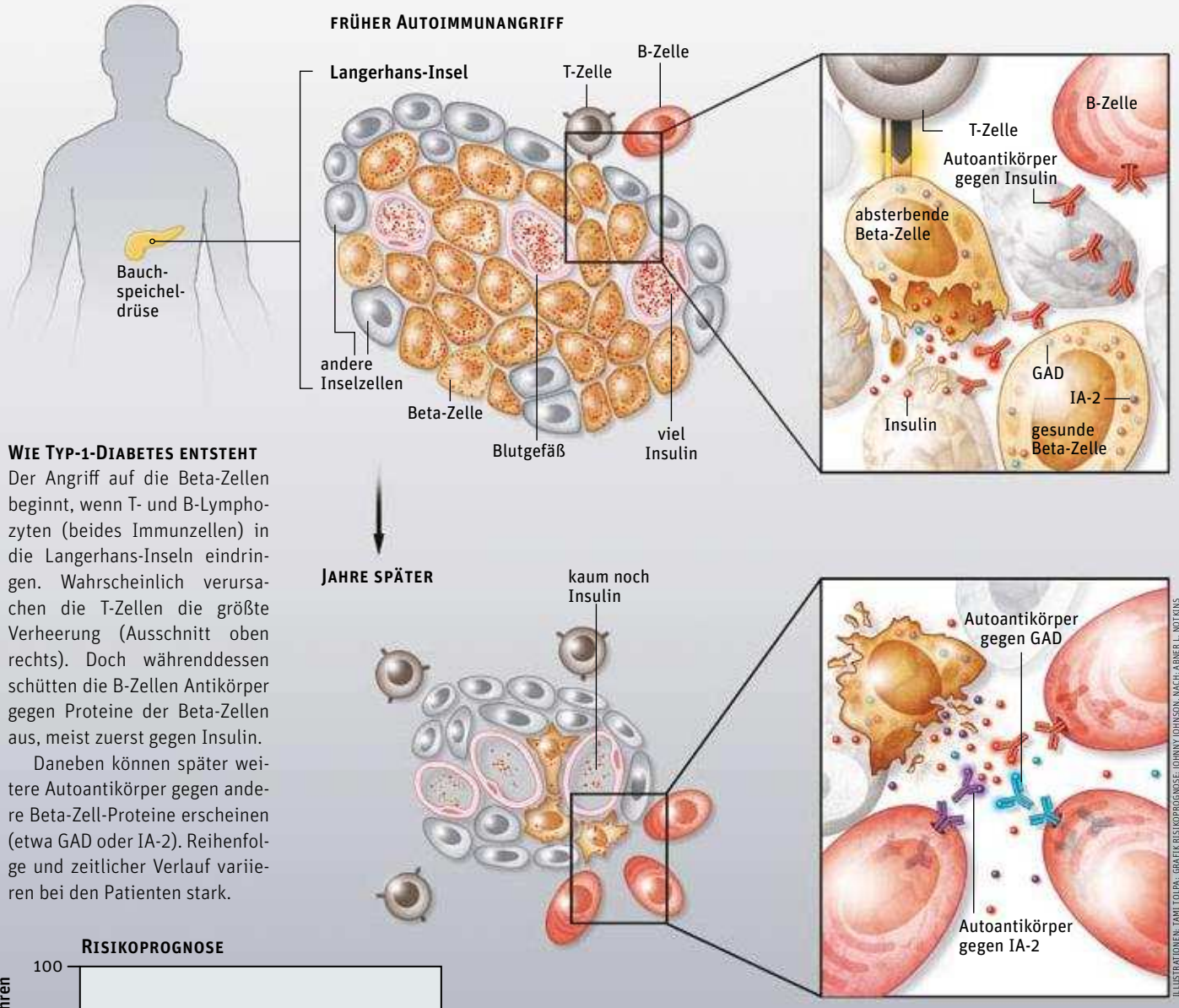
Bluttests im Rückblick

Noch steht nicht fest, ob die Autoantikörper, die mit diesen Proteinen reagieren, wirklich an der Zerstörung der Beta-Zellen mitwirken. Doch hochempfindlichen Tests zufolge tragen ungefähr 70 bis 90 Prozent der Typ-1-Diabetiker mindestens einen jener Antikörper, wenn ihre Krankheit diagnostiziert wird. Solche Tests eignen sich, um abklären zu helfen, ob ein Typ-1- oder Typ-2-Diabetes vorliegt. Denn Letzterer hat andere Ursachen und erfordert meist andere Maßnahmen. Er heißt auch Altersdiabetes und trifft oft übergewichtige ältere Erwachsene, inzwischen jedoch zunehmend auch Jugendliche, die sich falsch ernähren und zu wenig bewegen. Allerdings scheint etwa jeder zwanzigste Kranke, der als Typ-2-Diabetiker eingestuft wurde, Autoantikörper gegen Beta-Zellen aufzuweisen. Wenn die erste Diagnose nicht falsch war, wären diese Patienten von beiden Typen betroffen.

Das Interesse an den Autoantikörpern wuchs sprunghaft, als herauskam, dass sie lange vor Ausbruch der Krankheit erscheinen. Nun setzten verschiedene Langzeitstudien ein. Tausenden von gesunden Schulkindern wurden Blutproben abgenommen und zehn Jahre aufgehoben, während man die Entwicklung der Kinder weiter verfolgte. Wenn bei einem

Die Diabetes-Lektion

Forschung über Typ-1-Diabetes lieferte erstmals Hinweise darauf, dass so genannte Autoantikörper eine Autoimmunkrankheit lange im Voraus anzeigen könnten. Bei diesem juvenilen Diabetes attackiert das Immunsystem die Beta-Zellen in der Bauchspeicheldrüse, die das Stoffwechselhormon Insulin produzieren. Die Zuckerkrankheit macht sich bemerkbar, sobald nicht mehr genügend Beta-Zellen vorhanden sind. Jahre vorher erscheinen im Blut Antikörper gegen Moleküle dieser Zellen.



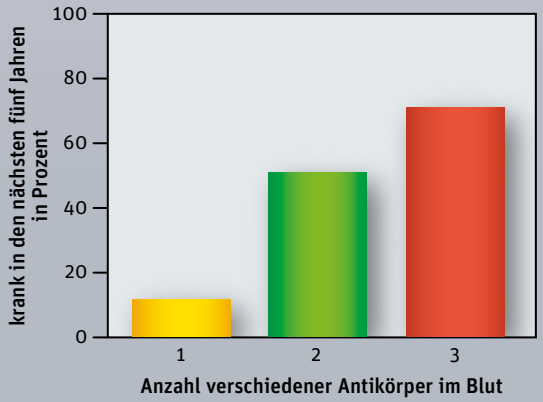
ILLUSTRATIONEN: TAMI TOLPA; GRAFIK RISIKOPROGNOSE: JOHNNY JOHNSON, NACH: ABNER L. NOTKINS

Wie Typ-1-Diabetes entsteht

Der Angriff auf die Beta-Zellen beginnt, wenn T- und B-Lymphozyten (beides Immunzellen) in die Langerhans-Inseln eindringen. Wahrscheinlich verursachen die T-Zellen die größte Verheerung (Ausschnitt oben rechts). Doch währenddessen schütten die B-Zellen Antikörper gegen Proteine der Beta-Zellen aus, meist zuerst gegen Insulin.

Daneben können später weitere Autoantikörper gegen andere Beta-Zell-Proteine erscheinen (etwa GAD oder IA-2). Reihenfolge und zeitlicher Verlauf variieren bei den Patienten stark.

Risikoprognose



Autoantikörper und Diabetes-Risiko

Die Wahrscheinlichkeit, dass in den nächsten Jahren ein Diabetes auftritt, steigt, wenn im Blut mehrere von drei Autoantikörpertypen vorkommen. Ob diese Antikörper – gegen Insulin, GAD und IA-2 – auch direkt mithelfen, die Beta-Zellen zu zerstören, ist noch unklar.

FOTO: CARY WOLINSKY; BEARBEITUNG: JEN CHRISTIANSEN

WAS MEDIZINER SICH VON TESTS AUF AUTOANTIKÖRPER VERSPRECHEN:

- Prognose eines Erkrankungsrisikos und vorgreifende Behandlung, unter Umständen, um den **Ausbruch zu verhindern** oder hinauszuzögern
- Prognose des **Zeitpunkts erster Symptome**
- Prognose des Krankheitsverlaufs und daran **angepasste Behandlung**
- weniger Aufwand bei der Erprobung **vorbeugender Maßnahmen**; Tests beschränken sich auf gefährdeten Personenkreis

LEXIKON

Antikörper: Immunproteine, die normalerweise spezifisch mit bestimmten Fremdsubstanzen (Antigenen) reagieren

Autoantikörper: Diese fehlgerichteten Antikörper reagieren mit körpereigenen Strukturen

Autoantigene: körpereigene Stoffe, die das Immunsystem wie etwas Fremdes behandelt

jener jungen Menschen irgendwann in dieser Zeit ein Diabetes vom Typ 1 auftrat, wurde dessen Blutprobe auf die Autoantikörper hin untersucht. Tatsächlich enthielt das Blut der meisten Erkrankten schon Jahre vor dem Ausbruch wenigstens eines jener Moleküle. Das galt selbst für die maximal verfolgte Zeitspanne von zehn Jahren.

Früher glaubten Mediziner, ein Typ-1-Diabetes würde plötzlich, binnen einiger Wochen, entstehen. Nun mussten sie erkennen, dass das Immunsystem die Bauchspeicheldrüse meistens wohl schon jahrelang unbemerkt malträtiert. Allerdings macht sich die Krankheit oft erst dann bemerkbar, wenn nicht mehr genug Beta-Zellen übrig sind, um den Körper ausreichend mit Insulin zu versorgen.

Doch nun besteht Aussicht, die Gefahr früher zu erkennen. Soweit heute bekannt, tragen Menschen, wenn sie einen dieser Autoantikörper gegen Beta-Zellen aufweisen, ein Risiko von zehn Prozent, binnen der nächsten fünf Jahre an juvenilem Diabetes zu erkranken. Bei zwei von den Antikörpern beträgt es schon 50 Prozent, bei dreien sogar 60 bis 80 Prozent.

Die medizinische Forschung über den Typ-1-Diabetes erlebte einen großen Auftrieb, als solche Vorhersagen möglich wurden. Solange man jene prognostischen Autoantikörper noch nicht kannte, waren klinische Studien über vorbeugende Maßnahmen praktisch kaum durchführbar. Diese Krankheit trifft etwa einen von 400 Menschen. Um die Wirkung einer Behandlung zu erproben, hätte man für einen solchen Test mehr als 40 000 Teilnehmer benötigt – damit wenigstens 100 gefährdete Personen darunter waren, an denen der Effekt hätte erfasst werden können.

Doch jetzt lässt sich die Teilnehmerzahl in Studien über Vorbeugungsmaßnahmen überschaubar halten. Die Forscher können nun gezielt gesunde Menschen auswählen, die zwei oder drei diabetesrelevante Autoantikörper haben. Ohne Eingriff würde von denen in spätestens fünf Jahren höchstwahrscheinlich mindestens jeder Zweite zuckerkrank sein. In einem Projekt erhielten zum Beispiel mehrere tausend potenziell gefährdete Personen prophylaktisch Insulin. Allerdings schützte diese Behandlung leider nicht vor dem Ausbruch eines Diabetes.

Natürlich wüssten wir gern, ob sich auch andere Autoimmunleiden mit Autoantikörpern ankündigen – etwa die rheumatoide Arthritis, der sich die Forschung seit Langem besonders intensiv widmet. An diesem entzündlichen Gelenkrheumatismus, bei dem das Immunsystem die Gelenkinnenhäute angreift und zerstört, leidet etwa jeder hundertste Weltbürger. Die Krankheit verursacht Schwellungen sowie starke Schmerzen und führt schließlich zu Gelenkversteifungen.

Kürzlich kam ein Autoantikörper zum Vorschein, den 30 bis 70 Prozent der Betroffenen aufweisen. Dieser Antikörper bindet sich an die Aminosäure Citrullin. Weitere Nachforschungen ergaben, dass der Autoantikörper tatsächlich schon im Blut vorkommt, wenn die Person noch keine Krankheitssymptome bemerkt. In einigen der untersuchten Proben war er nachweislich mehr als zehn Jahre vor den ersten Anzeichen vorhanden. Für Menschen mit diesem Antikörper ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine rheumatoide Arthritis ausbricht, 15-mal so groß wie sonst.

Bald Vorsorge gegen Polyarthritis?

Anders als beim Typ-1-Diabetes stünden gegen die rheumatoide Arthritis bereits Medikamente zur Verfügung, die den Ausbruch vielleicht verhindern oder zumindest hinauszögern könnten. Bekommen nämlich frisch Erkrankte rasch eine aggressive Therapie, zum Beispiel mit effektiven Entzündungshemmern, dann bleibt die Gelenkbeweglichkeit oft viel länger erhalten. Manchmal lässt sich der weitere Verfall der Gewebe sogar stoppen. Warum sollte eine vorgreifende Behandlung nicht noch günstiger verlaufen? Viele hoffen nun, dass bald alle Menschen – oder zumindest der familiär vorbelastete Teil – auf den Vorboten im Blut untersucht werden können. Wer den Antikörper gegen Citrullin besitzt, würde dann sogleich die Gegenmedikamente erhalten, bevor sich erste Schäden zeigen. Doch so weit ist es noch nicht. Erst müssen mehr klinische Studien erfolgen, um herauszufinden, ob diese Autoantikörper eine rheumatoide Arthritis wirklich zuverlässig ankündigen. Zudem brauchen wir einen preisgünstigen Test, weiterhin Vorgaben, wer untersucht werden sollte, auch wann und wie oft.

Manche Autoimmunerkrankungen treten nur bei Kontakt mit bestimmten Stoffen auf, die von außen kommen. Möglicherweise ließe sich hier eine Autoimmunaktivität unterbinden, indem Menschen, bei denen entsprechende Autoantikörper nachgewiesen wurden, die potenziellen Gefahrstoffe vermeiden. Zu solchen Krankheiten gehört die Zöliakie – bei Erwachsenen auch Sprue genannt –, bei der das Immunsystem beim Verzehr von glutenhaltigem Getreide die Dünndarmschleimhaut angreift und schädigt. Die schweren Symptome gehen bei glutenfreier Ernährung zurück. Oft tritt die Krankheit in der frühen Kindheit auf, sie kann sich aber auch erst bei Erwachsenen ausbilden.

Viele Zöliakie-Patienten haben einen Autoantikörper, der mit einem Enzym, der Ge-

Wissen, was heute wichtig ist

spektrum**direkt** ist Ihre Online-Tageszeitung in Sachen Wissenschaft. Die Redaktion informiert Sie schnell, verständlich und fundiert über den aktuellen Stand internationaler Forschungsprojekte.

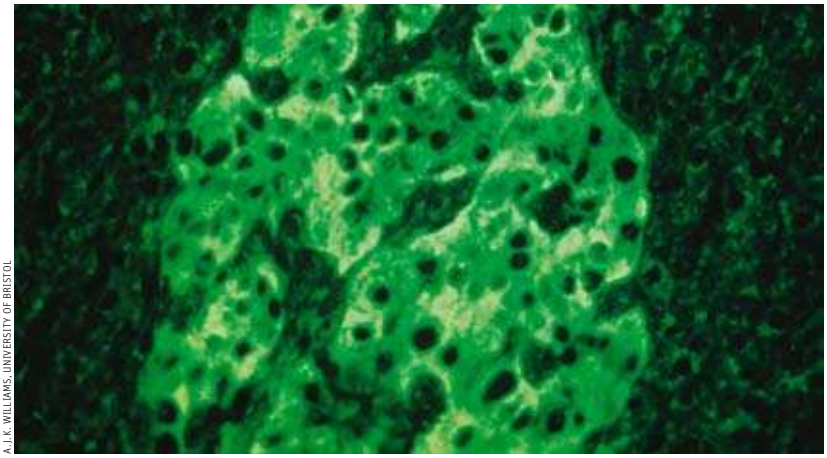
Ein Abonnement von spektrum**direkt** Premium bietet Ihnen viele Vorteile:

› alle Ausgaben stehen Ihnen als PDF-Datei zum Ausdruck zur Verfügung
› Sie können in einem Archiv mit über 18.000 Wissenschaftsartikeln recherchieren
› JETZT NEU: Sie haben Zugriff auf 13 Onlinelexika mit über 200 000 Artikeln

Weitere Informationen:

spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

www.spektrumdirekt.de/info



A. J. K. WILLIAMS, UNIVERSITY OF BRISTOL

Autoantikörper leuchten grün in diesem Präparat einer Langerhans-Insel aus der Bauchspeicheldrüse eines Menschen. Die Antikörper waren im Blut eines Diabetikers vorhanden, das zu dem Präparat gegeben wurde. Sie lagern sich speziell an die Beta-Zellen, nicht an das umgebende Gewebe.

webstransglutaminase, reagiert, das viele neu synthetisierte Proteine umbaut. Nach heutigem Wissen kann dieser Antikörper bis zu sieben Jahre vor den ersten Symptomen erscheinen. Denkbar wäre, dass gefährdete Personen gar nicht erst krank würden, wenn sie nach einer Frühdiagnose des Antikörpers prophylaktisch auf eine völlig glutenfreie Kost umstiegen. Ob eine derartige Vorsichtsmaßnahme funktionieren würde, ist allerdings noch nicht untersucht.

Zurzeit erforschen Immunologen, inwieweit solche Autoantikörper noch weitere medizinische Prognosen, etwa zum Fortgang der Krankheit, erlauben. Vielleicht lassen manche ja erkennen, wie schnell ein bereits erkanntes Autoimmunleiden wahrscheinlich fortschreiten wird oder mit welchem Schweregrad man rechnen muss.

Bei multipler Sklerose (MS) etwa treten anfangs oft nur relativ leichte Symptome auf, die dann nicht selten für eine Weile wieder völlig verschwinden. Dieser Zustand kann bei manchen Patienten lange anhalten. Auch gibt es Verlaufsformen, bei denen die Krankheitsschübe den Patienten nicht allzu stark beeinträchtigen. Doch ein Teil der Kranken muss sich mit häufigen, heftigen Schüben und gravierenden Symptomen plagen. Einige erleben sogar nie Phasen, in denen es ihnen vorübergehend wieder etwas besser geht.

In mancher Hinsicht wäre es hilfreich, wenn ein Arzt schon bei einem Patienten mit frühen Symptomen oder Anfangsverdacht feststellen könnte, ob ein Ausbruch der Krankheit und ein schwerer Verlauf zu erwarten ist. Dementsprechend könnte er ihn beraten und behandeln. Unter anderem führte eine Forschergruppe von der Universität Innsbruck hierzu im Jahr 2003 eine Untersuchung durch. Es ging um zwei Autoantikörper, die sich gegen zwei Proteine in der Myelinscheide – der Schutzhülle der langen Nervenzellausläufer – richten, die bei dieser Krankheit zerstört wird. Gut 100 Patienten mit frischer MS-Diagnose oder MS-Verdacht nahmen an der Studie teil. Für diejenigen mit beiden Antikörpern vervierfachte sich die Gefahr, dass die Krankheit nach vorübergehendem Abklingen der Symptome wieder ausbrach. Auch kam so ein Schub eher. Ob und wie gut sich ein solcher Antikörpertest zu einer genaueren MS-Prognose eignet, bleibt zu prüfen. Falls er sich bewährt, kann das Ergebnis die medizinische Behandlung leiten.

In den letzten Jahren kam heraus, dass Autoantikörper auch bei bestimmten Krankheiten auftreten können, die man normalerweise nicht mit einem Autoimmungeschehen

Autoimmunkrankheiten im Visier

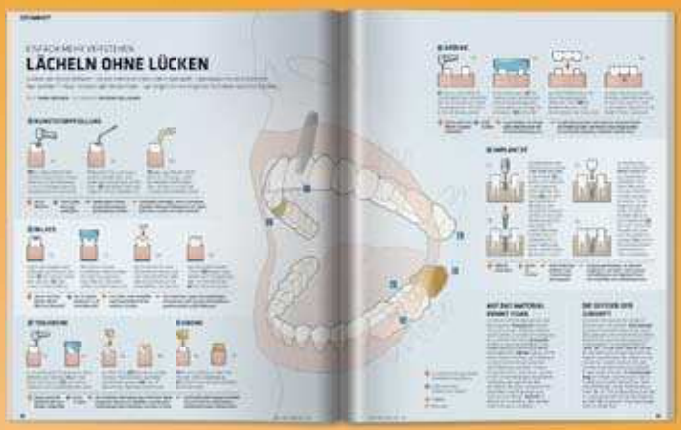
Außer beim Diabetes fanden Forscher bei weiteren Autoimmunleiden Autoantikörper, die einen Vorhersagewert dafür haben könnten, ob sich die Krankheit anbahnt und wie sie sich entwickeln wird. Hier einige Beispiele:

Krankheit	Stand der Forschung
Addison-Krankheit; Bronzehautkrankheit; Nebennierenrinden geschädigt	bei Kindern hohe Prognose, wenn Autoantikörper gegen Nebennierengewebe und das Enzym 21-Hydroxylase vorhanden sind
Antiphospholipid-Syndrom; wiederkehrende Thrombosen; Fehlgeburten	verschiedene Autoantikörper besagen vermutlich, dass Komplikationen auftreten können
Zöliakie; Dünndarmerkrankung, ausgelöst durch Gluten in der Nahrung	Autoantikörper gegen ein Enzym, die Gewebstransglutaminase, deuten auf ein Erkrankungsrisiko
multiple Sklerose (MS); neurologische Erkrankung mit Lähmungserscheinungen	Autoantikörper gegen Proteine der Myelinschicht um Nervenzellfasern scheinen auf ein Rückfallrisiko hinzudeuten
rheumatoide Arthritis; chronische Entzündung der Gelenke	bis zu zehn Jahre vor den ersten Symptomen fanden sich Autoantikörper gegen Citrullin, das beim Umbau vieler Proteine entsteht
systemischer Lupus erythematodes; kann viele Organe betreffen, u. a. Gelenke, Nieren und Haut	verschiedene Autoantikörper bekannt; bei bis zu 80 Prozent der Patienten erscheint vor den ersten Symptomen davon mindestens einer

Sie möchten mehr WISSEN?

Wie gesund ist Sport wirklich?

Neue Technik-Serie: Das Erfolgsrezept von Apple



Welcher Zahnersatz ist der richtige?

Galerie: Pflanzensamen unter dem Mikroskop

www.zeit-wissen.de

Erleben Sie ZEIT WISSEN, das intelligente Wissenschaftsmagazin! Lesen Sie Neues und Spannendes über Wissenschaft, Technik, Leben und Gesundheit: faszinierend, lebendig und lebensnah. Jetzt im Handel oder unter Tel. 0180/52 52 909 (14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz, Mobilfunkpreise können abweichen).

ZEIT WISSEN
DAS WILL ICH WISSEN

AUTOIMMUN-KRANKHEITEN

Bekannt sind einige dutzend Autoimmunkrankheiten. Manche betreffen speziell ein bestimmtes Organ oder Gewebe – etwa Haut, Leber, Nieren oder Blutgefäße. Andere schädigen überall im Körper bestimmte Strukturen. Auch Mischformen kommen vor.

assoziiert. Beispielsweise betrifft das einige Krebsarten. Das Tumorwachstum kontrollieren diese Autoantikörper wahrscheinlich nicht. Etliche Forscher versuchen aber herauszufinden, ob sie sich zur Krebsfrüherkennung eignen. Oder das Beispiel Arteriosklerose: Hier prüfen Forscher, ob Autoantikörper etwa eine erhöhte Schlaganfallgefahr anzeigen.

Bisher habe ich nur einige der häufigsten Autoimmunerkrankungen und dazu Arbeiten relativ weniger Forschungslabors angesprochen. Doch die medizinische Forschung und wirtschaftliche Unternehmen erkennen zunehmend, dass die Patientenbetreuung gewinnen kann, wenn man Autoantikörper erfasst. Inzwischen gibt es Bestrebungen, auch bei weiteren Autoimmunleiden vorhersagekräftige Autoantikörper zu finden.

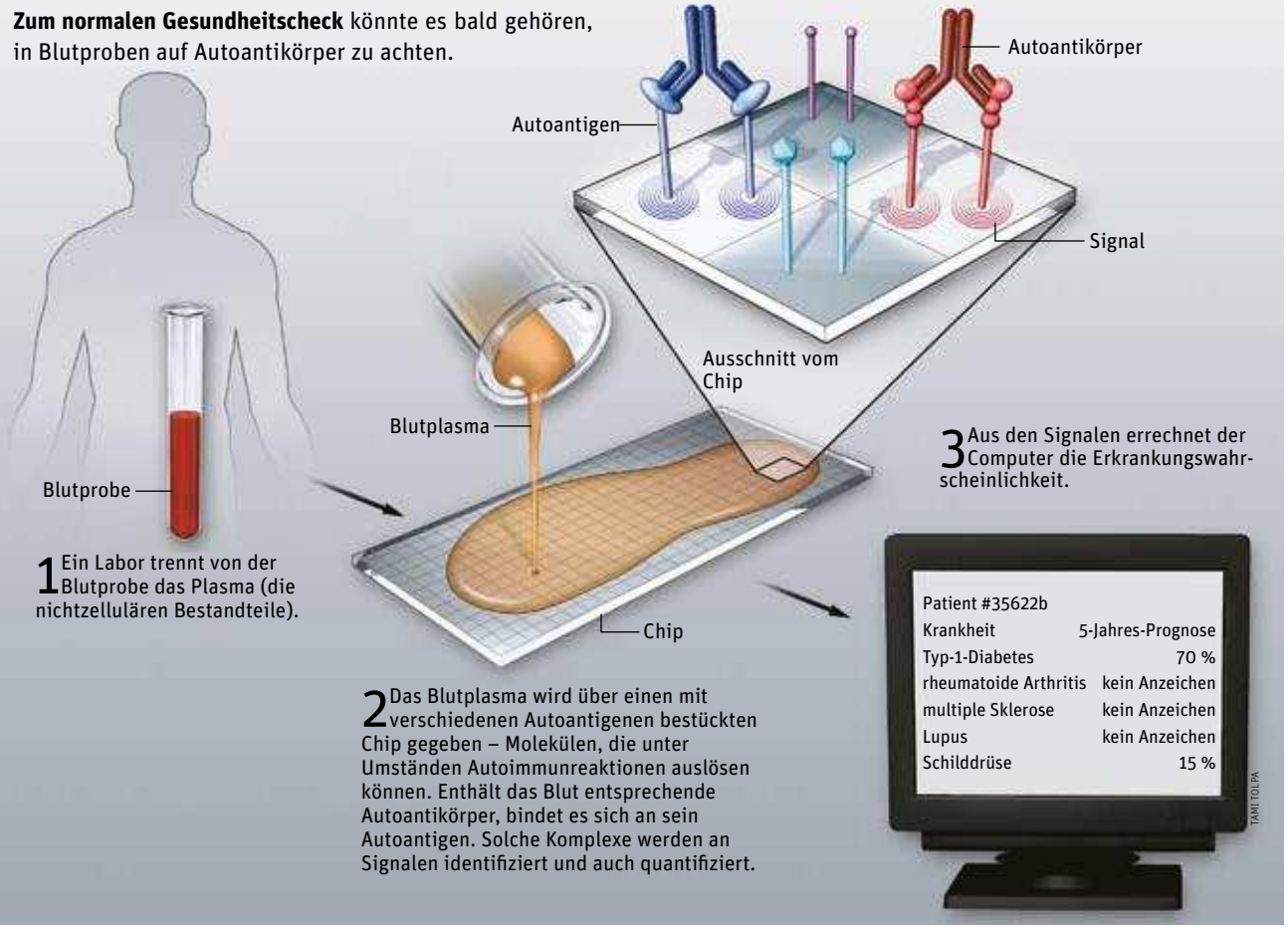
Einfach ist die Suche leider nicht. Im Prinzip wären langjährige, kostenintensive Projekte mit sehr großen Teilnehmerzahlen nötig, um schließlich belegen zu können, dass sich ein bestimmter Autoantikörper zehn oder mehr Jahre vor dem Ausbruch einer Autoimmunkrankheit zeigt.

Es gäbe aber Alternativen, die weniger Aufwand erfordern und viel weniger kosten. Eine wäre, schon vorhandene umfangreiche Gesundheits-Datenbanken zu nutzen. Zum Beispiel werden in den USA bei Angehörigen des Militärs seit Langem medizinische Daten und Blutproben gesammelt. Auch gibt es die Initiative Frauengesundheit mit bislang über 100 000 Teilnehmerinnen, von denen aus einer größeren Zeitspanne vielerlei Proben und Unterlagen vorliegen. Autoimmunforscher könnten mit Wissenschaftlern solcher Großprojekte zusammenarbeiten. Man würde die Datenbanken nach im Lauf der Zeit erkrankten Personen durchsehen und deren lange vorher eingelagerte Blutproben auf verdächtige Autoantikörper untersuchen. Erste Vorstöße zu solchen Projekten sind bereits erfolgt.

Bei einem anderen alternativen Ansatz würde man zunächst nach unbekannten Autoantigenen forschen. Dazu ließen sich aus den Datenbanken zum menschlichen Genom im Prinzip all jene genetischen Sequenzen holen, die für Proteine kodieren. Anhand dieser Information könnte man die entsprechenden Proteine im Labor herstellen. Dann bringt

ZUKÜNFTIGER AUTOIMMUNTEST BEIM HAUSARZT

Zum normalen Gesundheitscheck könnte es bald gehören, in Blutproben auf Autoantikörper zu achten.



1 Ein Labor trennt von der Blutprobe das Plasma (die nichtzellulären Bestandteile).

2 Das Blutplasma wird über einen mit verschiedenen Autoantigenen bestückten Chip gegeben – Molekülen, die unter Umständen Autoimmunreaktionen auslösen können. Enthält das Blut entsprechende Autoantikörper, bindet es sich an sein Autoantigen. Solche Komplexe werden an Signalen identifiziert und auch quantifiziert.

3 Aus den Signalen errechnet der Computer die Erkrankungswahrscheinlichkeit.

man Blutproben von Autoimmunpatienten mit den Proteinen zusammen und bestimmt, ob sich irgendwelche Protein-Antikörper-Komplexe bilden. So ließen sich sowohl neue Autoantigene aufspüren als auch dazugehörige Autoantikörper. Anschließend könnten Studien zur Vorhersagekraft dieser Autoantikörper erfolgen. Sicherlich bedeutet diese Vorgehensweise einigen Aufwand. Doch zumindest mit kleineren Proteinchargen nutzen ein paar Forscherteams sie schon. Meine Arbeitsgruppe etwa sucht auf die Weise nach neuen Autoantigenen beim Typ-1-Diabetes. Wir bauen dafür dutzende ausgewählte Proteine der Bauchspeicheldrüse, die bekanntermaßen bei der Insulinsekretion mitwirken.

Aufklärung erwünscht?

Die Medizin wird sich immer mehr dahin entwickeln, dass sie Krankheiten auch vorhersagt und dadurch verhindert. Fast sicher dürfte in zehn oder zwanzig Jahren zu einem Gesundheitscheck eine Autoantikörper-Vorsorgeuntersuchung dazugehören, die zumindest einige der Autoimmunkrankheiten abdeckt. Der Arzt schickt eine Blutprobe ins Labor, das auch gleich die heute schon üblichen Untersuchungen auf Blutzucker, Cholesterin und dergleichen durchführt. Zur Diagnose über Autoantikörper liefert das Labor vielleicht auch eine Prognose, mit welcher Wahrscheinlichkeit dem Patienten zum Beispiel ein Diabetes droht und wie akut die Gefahr ist (siehe Kasten links).

Noch genauer würde die Prognose in Kombination mit weiteren biologischen Informationen über den Patienten, etwa genetischen Daten. Beim Typ-1-Diabetes beispielsweise erhöhen bestimmte Versionen der so genannten HLA-Gene das Erkrankungsrisiko. Diese Gene kodieren wichtige Komponenten der Selbsterkennung, der immunologischen Histokompatibilität (Gewebeverträglichkeit).

Gegenwärtig wären Untersuchungen auf vorhersagekräftige Autoantikörper, soweit diese überhaupt schon bekannt sind, noch viel zu teuer und aufwändig für eine breite Anwendung. Nötig sind preiswerte, automatisierte und schnelle Analyseverfahren. Bisher beschäftigen sich damit allerdings erst wenige kleinere Biotechnologiefirmen.

Auch müsste geklärt werden, wer sich überhaupt vorsorglichen Autoantikörpertests unterziehen sollte und in welchen Abständen solch ein Test wiederholt werden muss. Bei einigen Krankheiten, die nur Erwachsene treffen, könnte es unsinnig sein, schon bei Kindern nach Vorzeichen zu suchen – und umgekehrt. Hierbei und beim Festlegen von Testabständen wird mitentscheiden, ob spezielle Autoantikörper schon Jahre oder gewöhnlich erst Monate vor dem Krankheitsausbruch auftreten.

Entscheidend ist bei diesen Entwicklungen zudem, inwieweit Therapien gegen die Autoimmunleiden verfügbar sind. Denn mancher mag einwenden, dass eine noch so gute Prognose wenig hilft, wenn der Patient keine schützende Behandlung erfahren kann oder wenigstens eine, die den Beginn der Krankheit verzögert oder ihren Verlauf mildert. Zwar bemühen sich hierum viele Forschungsprojekte. Trotzdem könnten Fortschritte auf sich warten lassen. Die Autoimmunkrankheiten sind recht verschiedenartig und ihre Hintergründe reichlich komplex.

Prognosen zu Krankheit und Tod berühren natürlich auch ethische Fragen. Nicht jeder wird seine Zukunft wissen wollen. Diese Haltung müssen Ärzte unbedingt respektieren. Eine andere Seite ist die Angst, dass Versicherer oder Arbeitgeber an die medizinischen Daten gelangen und sie missbrauchen, selbst wenn der Betreffende noch völlig gesund ist. Diesen Themen dürfen wir hier ebenso wenig ausweichen wie bei Gentests.

Zukunftsvorhersagen haben Menschen schon immer fasziniert, aber auch beunruhigt. Bei einem vernünftigen Umgang damit könnte solches Wissen allerdings Millionen von Patienten und deren Ärzten im Kampf gegen Autoimmunerkrankungen nützen. ◁

Was bei Prognosen zu bedenken ist

Prognosen von Autoimmunkrankheiten mittels Autoantikörpern werden wichtige ethische Aspekte und praktische Fragen berühren.

Sollten Ärzte Patienten auf zukünftige Krankheiten hin untersuchen, für die es (noch) keine Heilung oder Vorbeugung gibt?

Wie lässt sich einem Patienten vermitteln, dass ein positives Testergebnis nicht zwangsläufig die Krankheit vorhersagt, sondern eine Wahrscheinlichkeit dafür?

Wie lassen sich falsch-positive und ebenso falsch-negative Testergebnisse möglichst klein halten, die den Patienten unnötig aufregen oder in falscher Sicherheit wiegen?

Sind die Kosten von Routineuntersuchungen für alle angesichts des kleinen Anteils potenzieller Patienten gerechtfertigt?

Sollten bei erblichen Autoimmunleiden die Verwandten von Kranken prognostisch untersucht werden? Was ist leichter zu ertragen: relative Gewissheit oder quälende Ungewissheit?

Bringt ein positives Testergebnis eine Diskriminierung durch Arbeitgeber, Krankenversicherer oder die Gesellschaft mit sich?

FOTOS: GARY WOLINSKY

Abner Louis Notkins leitet an den amerikanischen Nationalen Gesundheitsinstituten in Bethesda (Maryland) die Abteilung für experimentelle Medizin des Nationalen Instituts für Zahn- und Schädelgesichtsforschung, dessen wissenschaftlicher Direktor er vorher war. Er hat über Virologie, Immunologie und Diabetes geforscht. Im Jahr 1986 erhielt er den Paul-Ehrlich-Preis.

Autoantibodies as diagnostic and predictive markers of autoimmune diseases. Von A. L. Notkins et al. (Hg.) in: Autoimmunity, Bd. 37, Heft 4, S. 251, Juni 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/910600.

Vor dreihundert Jahren geboren, wurde Carl von Linné zum Begründer des nach ihm benannten biologischen Systems, Arten zu benennen und zu klassifizieren. Mit der zehnten Auflage seines Standardwerks »Systema Naturae«, erschienen 1758, führte er schließlich für alle Organismen einen zweiteiligen wissenschaftlichen Namen ein – unsere Spezies firmiert seither unter dem Namen *Homo sapiens*. Seine Erben, die Taxonomen, stecken in der Krise, obwohl ihre Arbeit längst über bloßes Sammeln, Bestimmen und Beschreiben von Organismen hinausgeht und unter anderem für die Biodiversitätsforschung unentbehrlich ist. Es mangelt an Lehrstühlen und Fördermitteln, vielleicht auch, weil der Taxonomie das Image einer verstaubten Wissenschaft anhaftet. Charles Godfray, Populationsbiologe an der Universität Oxford, rät, das zu tun, was Linné getan hat: dem Endnutzer so gute Produkte anzubieten, dass dieser nach mehr verlangt. »Linné wäre heute ein Technikfreak gewesen, einer, der das Internet und andere moderne Mittel genutzt hätte«, um Daten weltweit zu koordinieren und gemeinschaftlich zu nutzen. Schließlich habe er die Lösung zur ersten Krise der Bioinformatik geboten. *Die Redaktion*

LINNÉ im Informationszeitalter

Die klassische biologische Disziplin schlechthin, die von Carl von Linné begründete Taxonomie, ist ins Abseits geraten. Ist guter Rat hier wirklich teuer?

Das englische Original dieses Beitrags erschien unter dem Titel »Linnaeus in the information age« in »Nature«, Bd. 446, S. 259, 2007

Von H. Charles J. Godfray

Zu den glänzenden Errungenschaften der Naturwissenschaft gehört, dass sie über ein Benennungs- und Klassifikationssystem für alle beschriebenen Organismen der Erde, einschließlich der fossilen Vorfahren, verfügt. Das Verdienst gebührt dem schwedischen Naturforscher Carl von Linné (1707–1778). Um sich in den Naturwissenschaften über irgendetwas verständigen zu können, so erkannte er, ist es notwendig, dass Dinge einen anerkannten einheitlichen Namen haben. Die Lektion haben die Schöpfer der heutigen Datenbanken für Gene und Proteine nicht vergessen. Das Jahr, in dem wir Linnés 300. Geburtstag und seine Leistungen gefeiert haben, ist der rechte Zeitpunkt darüber nachzudenken, wie die moderne Taxonomie zum Rest der Biologie steht und wie diese Beziehung sich weiterentwickeln mag.

Zu Linnés Zeiten erschien die natürliche Welt noch unveränderlich und vom Menschen relativ unberührt. Dies trifft heute nicht mehr zu, und ein größeres Bewusstsein für die sich verändernde biologische Vielfalt auf unserem Planeten lässt den Bedarf an taxonomischer Information und Fachkenntnis wachsen. Gleichzeitig verändert sich die Natur der Biologie: Aufgaben, die einst Taxonomen vorbehalten waren, können nun von den meisten Biologen auf ihre Weise übernommen werden. Angesichts dieser Realitäten müssen Taxonomen darüber nachdenken, wo bei ihren Bemühungen Prioritäten zu setzen und wie begrenzte Mittel am besten zu nutzen sind.

Do it yourself

Die meisten Biologen verwenden auf die eine oder andere Weise taxonomische Informationen: vom eingeschworenen Molekularbiologen, der zufrieden ist, wenn jeder versteht, dass es sich beim Genom »der Fliege« um das der Taufliege *Drosophila melanogaster* handelt, bis zum Ökologen, der Hunderte von Arten an einem Untersuchungsort identifizieren muss. Die Taxonomie liefert Gutachten zu Artgrenzen und zur stammesgeschichtlichen Verwandtschaft zwischen Arten. Sie stellt ein

BRIDGEMAN GIRAUDON (CARL VON LINNÉ, 1775 GEMALT VON ALEXANDER ROSLIN; SCHLOSS VERSAILLES)

Mit seiner brillanten Lösung für das Problem, das Wissen über immer mehr Arten zu organisieren, meisterte Carl von Linné vor rund 250 Jahren die erste Krise der »Bioinformatik«.

stabiles System der Namensgebung zur Verfügung, das – im heutigen Jargon – als ein Portal dient zu einem riesigen, wenn auch nicht immer leicht zugänglichen Informationsspeicher über eine Art. Wer für höhere Investitionen in die Taxonomie plädiert, hebt all diese möglichen Vorteile hervor – vergisst aber oft, dass viele der traditionellen Nutzergemeinschaften taxonomischer Information heute bei derartigen Fragen eigene Untersuchungen anstellen können.

Betrachten wir einmal die Rolle der Taxonomie bei der Entscheidung, was eine Art ist. Wer Argumente für die Wichtigkeit dieser Disziplin anführt, betont oft, wie entscheidend eine akkurate Artbestimmung zum Beispiel ist, um einen speziellen menschlichen Krankheitserreger zu bekämpfen oder um den geeigneten natürlichen Feind eines landwirtschaftlichen Schädlings zu identifizieren. Früher konnten diese kritischen Entscheidungen nur von Taxonomen getroffen werden, und sie beinhalteten typischerweise eine sorgfältige morphologische Untersuchung und den Vergleich mit konservierten Exemplaren. Heute werden zunehmend molekulare Marker zur Untersuchung von Populationsunterschieden herangezogen, und diese Analyse können die meisten Biologen durchführen. Tatsächlich ist bei keiner taxonomischen Frage mit medizinischen und ökonomischen Konsequenzen mehr vorstellbar, molekulare Techniken nicht einzusetzen. Und Biologen, die bisher vielleicht Taxonomen darum gebeten haben, den Stammbaum einer Gruppe zu erstellen, finden es zunehmend einfacher, auf genetischer Basis selbst die verwandtschaftlichen Beziehungen zu ermitteln, je billiger das Sequenzieren und je breiter verfügbar die Mittel dazu werden.

Spezialisten für Biodiversität, die an Grundlagenforschung und angewandter Forschung interessiert sind, müssen oft viele Arten bestimmen. Dafür brauchen sie entweder die »Produkte« der Taxonomie – Bestimmungsführer oder Monografien über Tiere oder Pflanzen – oder die Taxonomen selbst. Zu manchen Organismengruppen einiger geografischer Regionen existieren ausgezeichnete Informationsquellen. Oft genug aber fehlen sie, vor allem für die tropischen Brennpunkte

Entscheidend ist eine genaue Artbestimmung beispielsweise, um spezielle menschliche Krankheitserreger zu bekämpfen

HALVOR KNUTSEN, IMR; FOTO: ØYSTEIN PAULSEN

Feldökologen und Populationsbiologen etwa greifen immer häufiger zu molekularen Methoden, um eigenhändig Arten und deren Stammbaum zu bestimmen. Sie übernehmen damit Aufgaben, die einst das ureigenste Feld der Taxonomen waren. Wird deren Expertise überflüssig?

(Hot Spots) der Biodiversität, die des größten Schutzes und Forschungsaufwands bedürfen. Noch vor zehn Jahren wäre die einzige Lösung gewesen, mehr in die traditionelle Taxonomie zu investieren. Heute aber gibt es eine Alternative: molekulare Identifikationsmethoden, DNA-Barcodes (eine Art genetischer Fingerabdruck) oder verwandte Technologien, die es dank Hochdurchsatzverfahren erlauben würden, zu bestimmende Exemplare in größerem Umfang rasch verschiedenen Sequenzclustern zuzuordnen. DNA-Barcodes könnten sich völlig unabhängig von der Linné'schen Taxonomie entwickeln, auch wenn dies definitiv nicht die Absicht ihrer führenden Vertreter ist.

Mehr als nur ein Name

Somit mag es scheinen, als schwinde die Nützlichkeit der Taxonomie mit der Verfügbarkeit neuer Techniken. Bedrohlich für die Taxonomie, denn sie würde an sich zwar interessant bleiben, aber der Aufstieg alternativer Methoden könnte Argumente für mehr Investitionen auf diesem Feld gefährlich untergraben. Um dem entgegenzuwirken, müssen Taxonomen meiner Meinung nach Folgendes tun:

- Effektivität und finanziellen Wert der Taxonomie, wie sie heute betrieben wird, kritisch hinterfragen,
- Bedürfnisse ihrer Nutzergemeinde berücksichtigen und einige wissenschaftliche Großprojekte priorisieren, die diesen Bedürfnissen entgegenkommen,
- ihre gegenwärtigen Praktiken mit neuen molekularen Techniken verknüpfen, wie das viele von ihnen auch schon tun,
- den Zugang zu taxonomischer Information für Nichttaxonomen erleichtern und besonders klar herausstellen, wie die Taxonomie ein Portal zu sämtlichen Informationen über die verschiedenen Arten bietet.

Mancher wird den Utilitarismus dieser Argumente nicht mögen. Denn Taxonomie ist mit Recht eine stolze Wissenschaft und muss ihre Existenz nicht mit einer Dienstleisterfunktion rechtfertigen. Aber sie lebt in der realen Welt der Wissenschaftsfinanzierung und hat häufig darunter zu leiden. Allzu oft werden Taxonomen von ihren Vorgesetzten dazu gedrängt, sich als Ökologen, Evolutionsbiologen oder sogar als Informatiker auszugeben, um Mittel anzuwerben. Die Biologie und speziell die Biodiversitätsforschung braucht mehr Taxonomen, die intensiver wirkliche Taxonomie betreiben. Dies wird leichter zu erreichen sein, wenn diese Disziplin das tut, was Linné getan hat: dem Endnutzer so gute Produkte anbieten, dass dieser nach mehr verlangt.

Linnés Brillanz bestand darin, den Lösungsweg für die erste Krise der Bioinformatik zu bieten, nämlich für das Problem, wie sich das Wissen über die steigende Flut an Arten organisieren ließe, die in der Ära der Forschungsreisen entdeckt wurden. Seine Lösung war den Zeiten gedruckter Publikationen und altmodischer Postwege zu Lande und zu Wasser angemessen, aber wie hätte sein Ansatz heute ausgesehen?

Ich glaube, er wäre ein Technikfreak gewesen: einer, der das Internet und andere moderne Mittel zur gemeinsamen Nutzung und Koordination von Daten eingesetzt hätte. Keiner wird leugnen, dass das Web für die Taxonomie immer wichtiger wird. Weitaus weniger klar ist jedoch, in welchem Ausmaß sie aufs Netz umsteigen sollte und wie dies die geheiligten Regeln der biologischen Nomenklatur verändern wird, die in den jeweiligen »International Codes« festgeschrieben sind. Ich denke, dass der Schritt zu einer nur über das Web – und damit universell – zugänglichen Taxonomie für das zukünftige Gedeihen dieser Disziplin unerlässlich ist. Ich habe aber

auch Verständnis für die Vorsicht, die Kritiker dieser Ideen walten lassen wollen.

Ob die Taxonomie wirklich in toto auf das Netz umsteigt oder nicht – meiner Meinung nach ist es entscheidend für dieses Fach, auch seine Rolle als ein Kurator von Informationen über Taxa (Organismen-Gruppen), nicht nur von Namen und maßgeblichen Exemplaren zu betonen. Einige exzellente Projekte beginnen gerade, genau dies zu tun. Dazu gehört zum Beispiel »FishBase«, die alle möglichen Informationen über diese Tiergruppe zusammenführt: Hier kann man etwas über die Morphologie, Reproduktionsbiologie und Ökologie einer Fischart erfahren, über ihre Populationsdynamik und die für sie tolerablen Umweltbedingungen, auch ob wir sie essen können – oder ob sie uns fressen kann. Von solchen Projekten brauchen wir mehr, neben Schritten, die klassische Taxonomie mit neuen Initiativen wie dem DNA-Barcoding zu verbinden.

Nehmt auch Laien mit ins Boot

Dem Netz fällt auch eine Rolle dabei zu, die Taxonomie ökonomisch effizienter zu gestalten. Mit seiner Hilfe können die arbeitsnotwendigen Informationen über maßgebliche Exemplare und Fachliteratur zusammengeführt und Ergebnisse verbreitet werden. Aber warum sollte hier schon Schluss sein? Eine wichtige Rolle in der Taxonomie spielt das Typus-Exemplar (das Exemplar, das als namensgebender Typus mit entsprechendem Vermerk in einer wissenschaftlichen Sammlung aufbewahrt wird und die Bezugsgrundlage für die Bestimmung der Art darstellt. Die Redaktion), etwa wenn es darum geht, Meinungsverschiedenheiten bei Artbestimmungen beizulegen. Nun sind die Typus-Exemplare allerdings oft sehr alt und nicht mehr im besten Zustand. Mit jedem Nachprüfen in Zweifelsfragen wächst die Gefahr weiterer Schädigung. Der Zugang dazu bleibt vernünftigerweise beschränkt. Zu den meisten Typus-Exemplaren fehlen zudem zugehörige Sequenzdaten.

Vielleicht müssen wir eine neue Form von Referenz-Exemplar – nennen wir sie den Cybertypus – schaffen, der unter Einsatz der allerbesten bildgebenden Methoden übers Netz präsentiert und zur Prüfung herangezogen werden kann (was oft einer normalen Untersuchung weit überlegen ist) und für den auch geeignete Sequenzdaten zur Verfügung stehen.

Pflanzentaxonomen dürfen bereits ein neues Referenz-Exemplar, einen Epityp, auswählen, um bei der Interpretation eines nicht eindeutigen Originaltyps zu helfen. Es wäre nützlich, diese Praxis auf Tiere auszuweiten und dieses Konzept speziell an die netzbasierte und molekulare Taxonomie anzupassen.

Als Wissenschaftler werden wir zu Recht zu mehr öffentlichem Engagement ermutigt. Die Taxonomie ist eine der wenigen Disziplinen (neben der Astronomie), bei der Laien wirklich wichtige Beiträge leisten können – die geradezu unermessliche Vielfalt von Lebewesen auf unserem Planeten macht eine Zusammenarbeit sogar unentbehrlich. Schwierigkeiten im Zugang zu taxonomischen Informationen wirken wie eine Bremse auf die Forschung und mindern deren Qualität. So viel Taxonomie wie möglich ins Web zu bringen, wird eine große Laiengemeinschaft mit ins Boot nehmen und zugleich Experten in Entwicklungsländern helfen, wo sich die Hot Spots der Biodiversität befinden.

Auf dem naturgegeben weiten Feld der Taxonomie fällt es schwer, bei Forschung und Investitionen Prioritäten zu setzen. Großprojekte sind zum Teil zu groß und allumfassend – zum Beispiel die Ansätze, alle Arten auf der Erde zu katalogisieren – und kommen nicht voran. Andere Projekte sind außergewöhnlich wertvoll für die Zunft selbst (zum Beispiel Listen von Namen und Synonymen), aber weniger relevant für die Nutzerkreise der Taxonomie. Die Disziplin könnte zweckmäßigerweise mit der breiteren biologischen Community zusammenarbeiten, um einige vorrangige taxonomische Großprojekte zu definieren, die in den nächsten zehn Jahren oder darüber hinaus durchführbar sind. Ganz ähnlich wird es ja in der Physik und Astronomie bereits gemacht.

Meine persönliche Wunschliste favorisiert – einseitig – landlebende Eukaryoten (Organismen, deren Erbgut anders als etwa bei Bakterien in einem Zellkern eingeschlossen ist. Die Redaktion) ohne die fossilen Formen. Auf ihr stehen: eine webbasierte globale Flora, ein vollständiger Stammbaum der lebenden Wirbeltiere und eine verständliche webbasierte Quelle von taxonomischen plus Identifikationsdaten (Morphologie samt DNA-Barcodes) für die Großschmetterlinge der Welt. Letztere habe ich ausgewählt, weil ich sie für die einzige große, weltweit verbreitete Gruppe wirbelloser Tiere halte, die für Laien relativ leicht zu identifizieren ist. Sie wäre daher als Instrument des Biodiversitäts-Monitoring von unschätzbarem Wert.

Die Wunschliste anderer dürfte von meiner abweichen, und es wird zweifelsohne hart für Taxonomen und andere Biologen, hier einen Konsens zu finden. Aber so eine Liste, die von der wissenschaftlichen Gemeinschaft unterstützt wird und sich eng an den Bedürfnissen der Endnutzer orientiert, wäre ein wundervoller Ansatz, um dem Feld neue Ressourcen zu erschließen. ◁

Die Taxonomie ist – neben der Astronomie – eine der wenigen Disziplinen, bei der Laien wirklich wichtige Beiträge leisten können

H. Charles J. Godfray arbeitet am zoologischen Department der Universität Oxford, South Park Road, Oxford OX1 3PS, Großbritannien.

© Nature Publishing Group
www.nature.com/nature

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/910602.

AUF DEN NÄCHSTEN SEITEN FOLGT EIN SONDERTEIL DER GESELLSCHAFT FÜR MEDIZIN UND MEDIEN. DIES IST KEIN REDAKTIONELLER BEITRAG VON SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT. >>>>

ZURÜCK ZU DEN WURZELN?

GETTY IMAGES / NATIONAL GEOGRAPHIC, MICHAEL S. LEWIS

Die industrielle Landwirtschaft würde nachhaltiger werden, wenn die wichtigsten Kulturpflanzen mehrjährig wachsen und tiefgründige Wurzelsysteme ausbilden könnten.

Von Jerry D. Glover,
Cindy M. Cox und John P. Reganold

Vielen von uns, die in reichen Regionen der Erde leben, beweist die Badezimmerwaage: Wir haben mehr als genug zu essen. Dies könnte manche zu dem Glauben verleiten, der Anbau unserer Feldfrüchte sei ein einfacher, vielleicht sogar zu leichter Job. Doch das Gegenteil trifft zu: Moderne Agrarwirtschaft verbraucht gewaltige Mengen an Land, Wasser, Energie und Chemikalien.

Angesichts dessen urteilte im Jahr 2005 das von der Uno geförderte Millennium Ecosystem Assessment: Landwirtschaft könnte einmal »unter allen menschlichen Aktivitäten die größte Bedrohung für die Biodiversität und das Funktionieren unserer Ökosysteme« darstellen.

Für uns Menschen bilden heute Getreide, Hülsenfrüchte und Ölsaaten direkt oder indirekt (als Tierfutter) die Grundlage der meisten Nahrungsmittel. Diese Grundnahrungsmittel sind für Hersteller und Verbraucher deshalb so günstig, weil sie leicht zu transportieren und zu lagern sind, nicht so schnell verderben und relativ viele Proteine und Kalorien enthalten.

Daher nehmen diese Nutzpflanzen auch 80 Prozent der weltweiten Anbauflächen in Beschlag. Hierbei handelt es sich aber leider stets um einjährige Pflanzen, das heißt, sie müssen jedes Jahr aufs Neue aus Samen gezogen werden. Dies erzwingt zumeist Kultivierungsmethoden, die erhebliche Ressourcen verbrauchen. Das wird die Umwelt künftig noch stärker belasten, wenn die hungrige Menschheit in den kommenden Jahrzehnten auf acht oder zehn Milliarden anwächst.

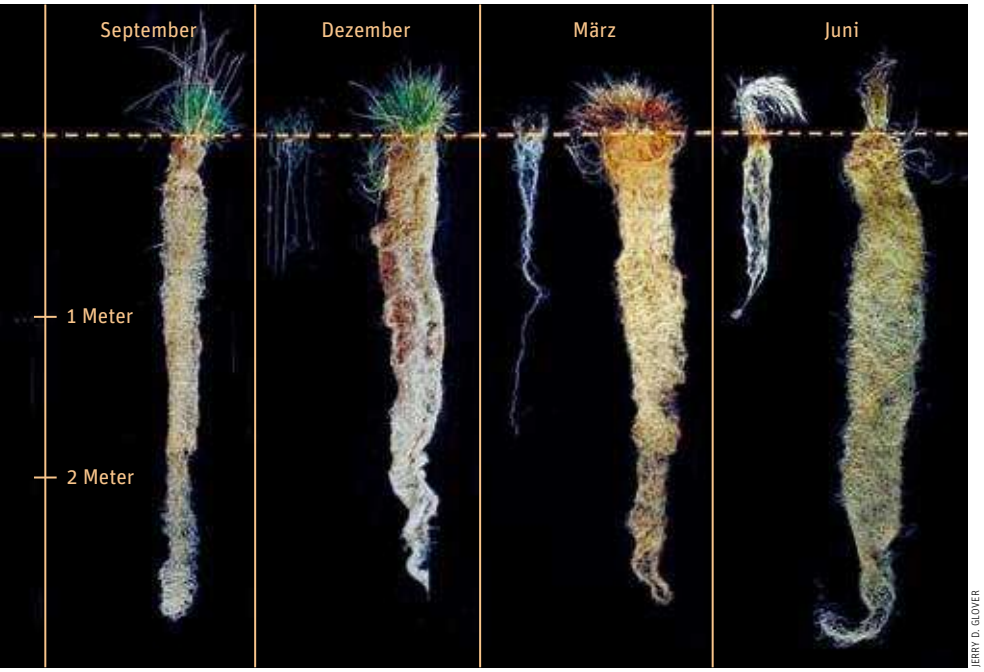
Aus diesem Grund arbeiten eine Reihe von Pflanzenzüchtern, Agrarwissenschaftlern und Ökologen daran, Feldfrüchte und Anbauoptionen zu entwickeln, die ähnlich wie natürliche Ökosysteme funktionieren, die aber von der Landwirtschaft verdrängt worden sind. Der Schlüssel zum Erfolg liegt darin, unsere wichtigsten Anbaupflanzen in mehrjährige,

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

GETTY IMAGES

In Kürze

- **Die intensive Bodennutzung** in der modernen Landwirtschaft beschädigt natürliche Biodiversität und Ökosysteme. Die Zahl der Menschen wird aber in den nächsten Jahrzehnten auf acht bis zehn Milliarden anwachsen, was die Kultivierung von noch mehr Land erforderlich macht.
- **Der Ersatz einjähriger Nutzpflanzen** durch mehrjährige würde zu tiefen Wurzelsystemen führen, die den Boden erhalten und die eine Landwirtschaft auch in bisher als karg angesehenen Gegenden ermöglichen würden.
- DieHerausforderung ist gigantisch, aber wenn Pflanzenforscher erfolgreich sind, würden **neue Sorten** mit den Kulturpflanzen konkurrieren, die die Menschheit in den letzten zehntausend Jahren gezüchtet hat – was genauso revolutionär wäre.



JERRY D. GLOVER

Mehrjährige Pflanzen wie das Weizengras (immer rechts in der obigen Bildserie) haben mit ihren gut entwickelten Wurzeln besseren Zugang zu Wasser und Nährstoffen als die einjährigen wie Winterweizen (immer links in obiger Bildserie). Zudem unterstützen die Wurzeln mehrjähriger Pflanzen Mikroorganismen und andere Prozesse, die den Boden anreichern. Der daraus entstehende dunkle, krümelige Boden (im rechten Bild rechts) speichert eine Menge Wasser und Nährstoffe; Boden von einem angrenzenden Feld mit einjährigen Pflanzen (im rechten Bild links) ist heller mit einer klumpigeren Struktur.

STEVE CULMAN, CORNELL UNIVERSITY

ausdauernde Sorten zu verwandeln. Tatsächlich ist diese Idee schon jahrzehntealt, und es wird wohl weitere Jahrzehnte dauern, bis sie umgesetzt ist. Die zu erwartenden Fortschritte in der Pflanzenzüchtung werden uns diesem Ziel aber schließlich näherbringen.

Die meisten Farmer oder Forscher, die über die Felder gehen und sich dabei überlegen, wie man die Probleme lösen könnte, sehen Landwirtschaft durch die Brille heutiger Erfolge und Misserfolge. In den 1970er Jahren jedoch versetzte sich der Pflanzengenetiker Wes Jackson gedanklich zehntausend Jahre zurück in die Vergangenheit, um unseren Ackerbau mit den natürlichen Systemen von damals zu vergleichen. Bevor die Menschen durch Domestikation und Anbau den einjährigen Pflanzen zu ihrem Siegeszug verhalfen, dominierte in fast allen Regionen der Erde eine bunte Mischung aus ausdauernden Pflanzen – so wie heute noch in nicht kultivierten Gegenden. So sind etwa in Nordamerika über 85 Prozent der natürlichen Pflanzenarten mehrjährig.

Wes Jackson gründete 1976 in Kansas das gemeinnützige Land Institute mit dem Ziel, eine naturnähere Landwirtschaft zu entwickeln. Ihm war aufgefallen, dass mehrjährige Gräser und Blumen der Prärien in Kansas über Jahre hinweg hochproduktiv waren und zugleich sogar fruchtbare Böden aufbauten. Zu ihrem Wachsen und Gedeihen benötigten diese Pflanzen weder Dünger, Pestizide noch Herbizide; dennoch konnten sie sich vor Parasiten, Schädlingen und Krankheiten schützen. Das Wasser, das durch oder aus dem Prärieboden lief, war klar, und Tiere gab es im Überfluss.

Im Gegensatz dazu musste Jackson feststellen, dass in der näheren Umgebung Felder mit Mais, Hirse, Weizen, Sonnenblumen oder Sojabohnen nur mit ständigem und großem finanziellem Aufwand produktiv blieben. Weil einjährige Pflanzen nur relativ flache Wurzeln ausbilden – die meisten befinden sind in den oberen 30 Zentimetern des Bodens – und nur bis zur Ernte leben, leiden viele ihrer Anbauflächen unter Erosion, ausgelaugten Böden und verschmutztem Wasser. Zudem fehlt in den unheimlich stillen Feldern die Tierwelt fast völlig. Kurz: Einjährige Monokulturen leiden unter zahlreichen Dauerproblemen. So lag die Lösung für den Agrarforscher Wes Jackson ihm gewissermaßen zu Füßen: widerstandsfähige und unterschiedliche mehrjährige Wurzelsysteme!

Emmer und wilde Gerste

Wenn einjährige Kulturpflanzen Probleme verursachen, von denen natürliche Ökosysteme frei sind – warum entwickeln dann keine unserer Feldfrüchte mehrjährige Wurzeln? Die Antwort führt zu den Ursprüngen der Landwirtschaft. Als unsere neolithischen Vorfahren in der Nähe ihrer Behausungen erstmals Samen tragende Pflanzen anbauten, gab es wahrscheinlich mehrere Gründe dafür, die einjährigen Sorten zu bevorzugen.

Die ersten domestizierten Einjährigen – Emmer und wilde Gerste – hatten verführerisch große Samenkörner. Für regelmäßig gute Ernten werden die Farmer der Jungsteinzeit vermutlich einige der geernteten Samenkörner wieder ausgesät haben. Die Eigenschaften wilder Pflanzen variieren sehr stark, sodass unsere Vorfahren Pflanzensamen mit den bevorzugten Eigenschaften ausgewählt haben werden. Das betrifft nicht nur den Ertrag, sondern auch einfaches Dreschen und Widerstandsfähigkeit.

So übten die frühen Bauern unbeabsichtigt und unwissentlich einen evolutionären Selektionsdruck aus. Das Resultat sind domestizierte einjährige Pflanzen mit mehr positiven Eigenschaften als bei ihren wilden einjährigen Verwandten. Zwar können auch einige mehrjährige Getreidesorten akzeptable Samen-

größen gehabt haben – sie mussten aber nicht wieder ausgesät werden und unterlagen somit nicht demselben, möglicherweise positiven Auswahlprozess.

Heute werden die Eigenschaften von ausdauernden Sorten wieder höher bewertet. Da ihre Wurzeln häufig über zwei Meter tief in den Boden reichen, regulieren mehrjährige Pflanzengesellschaften in Ökosystemen entscheidend den Wasserhaushalt sowie den Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf. Obwohl es Energie kostet, im Winter genug unterirdisches Gewebe aufrechtzuerhalten, werden die Wurzeln dieser Pflanzen tief im Boden aktiv, sobald die Temperaturen hoch genug sind und Wasser sowie Nährstoffe zur Verfügung stehen. So sind die Pflanzen hochproduktiv und können zugleich auf umweltbedingte Stressfaktoren flexibel reagieren.

In einer ein Jahrhundert dauernden Studie über Faktoren, die die Bodenerosion beeinflussen, erwies sich das Wiesen-Lieschgras, ein mehrjähriges Heugras, in der Erhaltung der Ackerkrume als 54-mal effektiver als einjährige Pflanzen. Wenn die Böden mit Luzerne und einer Mischung aus ausdauernden Gräsern bepflanzt waren anstatt mit Mais oder Sojabohnen, verloren die Anbauflächen fünffach weniger Wasser sowie 35-fach weniger Nitrate. Mit ihren tieferen Wurzeln und längeren Wachstumsperioden können Mehrjährige über 50 Prozent mehr Kohlenstoff speichern – Kohlenstoff ist der Hauptbestandteil organischen Bodenmaterials –, im Vergleich zu Feldern mit Einjährigen. Mehrjährige müssen nicht jedes Jahr neu gepflanzt werden; dies reduziert den Einsatz von Landmaschinen, Pestiziden und Dünger und damit den Verbrauch fossiler Rohstoffe. Die Pflanzen verringern so den Gehalt an Kohlendioxid in der Luft und verbessern zugleich die Qualität und Fruchtbarkeit der Böden.

Die Kosten für Herbizide für den Anbau einjähriger Sorten können vier- bis achteinhalbmal höher liegen als für mehrjährige Arten. Der Anbau solcher Pflanzen kommt den Landwirt also einfach billiger. Auch die Tierwelt profitiert davon: Vogelpopulationen beispielsweise siedeln in Feldern mit mehrjährigen Anbausorten siebenmal dichter als bei Einjährigen. Für eine hungrige Weltbevölkerung ist vielleicht am wichtigsten, dass sich ausdauernde Arten auf magerem Land nachhaltiger kultivieren lassen. Weniger fruchtbare Anbauflächen verfügen über eine geringere Bodenqualität und sind nach wenigen Jahren intensiver Bewirtschaftung mit einjährigen Pflanzen bereits ausgelaugt.

Aus all diesen Gründen haben Pflanzenzüchter in den USA und anderswo in den letzten fünf Jahren Forschungs- und Zuchtprogramme initiiert, um Weizen, Hirse, Sonnenblumen und weitere Arten als mehrjährige Anbaupflanzen zu entwickeln. Im Vergleich zur Erforschung einjähriger Nutzpflanzen steckt die Entwicklung dieser Sorten noch in den Kinderschuhen. Die Pflanzenzucht hat aber in den letzten Jahrzehnten deutliche Fortschritte gemacht. Mit ihren Resultaten können in den kommenden 25 bis 50 Jahren sehr ertragreiche, mehrjährige Anbausorten entwickelt werden.

Wer solche Nutzpflanzen züchtet, nutzt im Wesentlichen die gleichen Methoden wie andere Forscher in der Landwirtschaft: direkte Domestikation wilder Pflanzen und Kreuzung existierender einjähriger Getreidepflanzen mit ihren wilden Verwandten. Diese Techniken können sich möglicherweise ergänzen; aber auch jede für sich bietet schon eigene Vorteile.

Uramerikaner züchteten die großköpfigen Sonnenblumen

Die direkte Kultivierung wilder Mehrjähriger ist der geradlinigere Ansatz, um solche Nutzpflanzen zu erschaffen. Züchter wollen die Häufigkeit von Genen für die gewünschten Eigenschaften erhöhen. Dazu gehören die leichte Trennung von Samen und Spelzen, keine aufspringenden Samenkörner, große Samenkörner, synchrone Reifezeit, Genießbarkeit, starke Stängel und eine hohe Samenausbeute. Viele existierende Arten wie Mais oder Sonnenblumen sind so entstanden. Frühe Einwohner Amerikas beispielsweise verwandelten wilde Sonnenblumen mit kleinen Köpfen und Samenkörnern in die bekannten großköpfigen Sonnenblumen mit großen Samenkörnern (siehe den Kasten auf S. 94 »Wie eine neue Nutzpflanze entsteht«).

Die heutigen Programme zur Kultivierung mehrjähriger Pflanzen konzentrieren sich auf das intermediate Weizengras *(Thinopyrum intermedium)*, die hohe Staudensonnenblume *(Helianthus maximiliani)*, die Präriemimose *(Desmanthus illinoensis)* sowie Flachs, eine ausdauernde Art aus der Gattung *Linum*. Unter diesen ist die Kultivierung des Weizengrases, eines mehrjährigen Verwandten des Weizens, heute vielleicht am weitesten fortgeschritten.

Nimmt man eine existierende einjährige Kulturpflanze, um durch Kreuzung – einer künstlichen Paarung zweier unterschiedlicher Arten – eine mehrjährige zu erhalten, lassen sich Eigenschaften der domestizierten einjährigen Art mit denen ihrer wilden mehrjährigen Verwandten kombinieren. Kultivierte Arten besitzen bereits erstrebenswerte Eigenschaften

GETTY IMAGES

DIE TOP TEN DER NUTZPFLANZEN

2004 beanspruchten einjährige Getreidepflanzen, Hülsenfrüchte und Ölsaaten 80 Prozent der weltweiten Anbauflächen. Die häufigsten drei unter ihnen bedeckten mehr als die Hälfte dieses Gebiets.

Nutzpflanze	Land in Prozent
1. Weizen	**17,8**
2. Reis	**12,5**
3. Mais	**12,2**
4. Sojabohne	**7,6**
5. Gerste	**4,7**
6. Hirse	**3,5**
7. Baumwolle	**2,9**
8. Bohnen	**2,9**
9. Hirse	**2,8**
10. Raps/Senf	**2,2**

QUELLE: FAO

NUTZEN

NACHHALTIGE LANDWIRTSCHAFT: ZUKUNFT UND GEGENWART

Potenzielle Vorteile künftiger ausdauernder Anbaupflanzen zeigen sich heute, wenn wir beide vergleichen: das mehrjährige Weizengras (unten links) neben einem Feld mit kultiviertem einjährigen Weizen (unten rechts). Mehrjährige Weizensorten werden eines Tages gleiche Erträge bringen können wie einjährige, aber sie könnten mehrere Jahre leben und würden unterirdisch mehr dem Weizengras ähneln. Solche Anbaupflanzen können Ressourcen besser nutzen und so die Landwirtschaft und ihre Auswirkungen auf die Umwelt verändern. Gleichzeitig

FAKTOR KOHLENSTOFF

Mehrjährige Agrarpflanzen tragen nicht zur globalen Erwärmung bei: Sie geben weniger Treibhausgase (Kohlendioxid) ab, als sie speichern. Die widerstandsfähigeren ausdauernden Sorten werden mit einer globalen Erwärmung vermutlich besser zurechtkommen als einjährige.

KOHLENSTOFFAUFNAHME IM BODEN
(in Kilogramm pro Hektar und Jahr)

Einjährige	0 bis 450
Mehrjährige	320 bis 1100

ABGABE DES TREIBHAUSGASES KOHLENDIOXID
(in Kilogramm pro Hektar und Jahr)

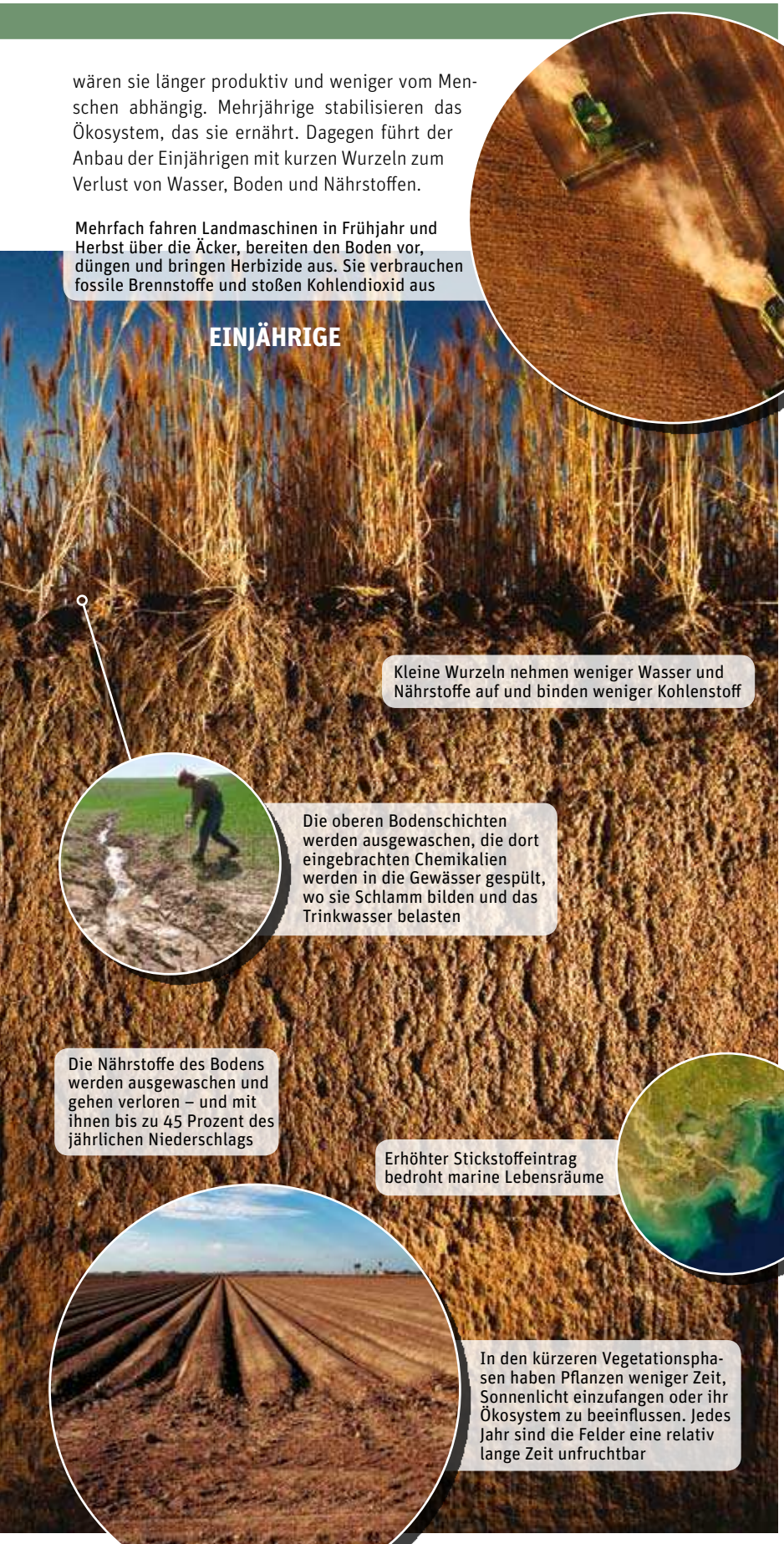
Einjährige	140 bis 1440
Mehrjährige	–1050 bis –200

GESCHÄTZTE WIRKUNG AUF DIE ERTRÄGE BEI EINEM TEMPERATURANSTIEG UM 3° C BIS 8° C
(in Tonnen pro Hektar)

Einjährige	–1,5 bis –0,5
Mehrjährige	+5

GROSSES BILD (BODENQUERSCHNITT) UND LANDMASCHINEN OBEN RECHTS: JIM RICHARDSON; KLEINE BILDER AUF DER LINKEN SEITE: THE LAND INSTITUTE; RECHTS MITTE (MANN AUF FELD): KEN CEDENO; MARINE LEBENSRÄUME: NASA, GSFC, SEAWIFS PROJECT UND GEOEYE; BRACHLIEGENDES FELD: USDA / ARS, JACK DYKINGA

wären sie länger produktiv und weniger vom Menschen abhängig. Mehrjährige stabilisieren das Ökosystem, das sie ernährt. Dagegen führt der Anbau der Einjährigen mit kurzen Wurzeln zum Verlust von Wasser, Boden und Nährstoffen.



wie beispielsweise hohe Erträge. Ihre wilden Verwandten können dagegen genetische Variationen für Weiteres beisteuern: etwa die Mehrjährigkeit an sich, aber auch Resistenzen gegenüber Krankheiten und Schädlingen.

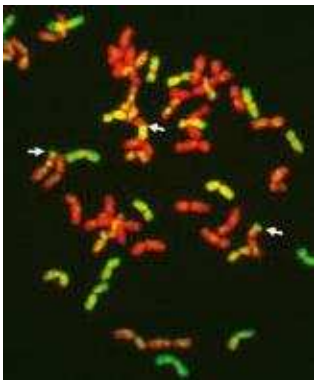
Unter den 13 am häufigsten angebauten Getreidesorten und Ölsaaten können zehn mit mehrjährigen Verwandten gekreuzt werden. Dies berichtet der Pflanzenzüchter T. Stan Cox, der wie Wes Jackson am Land Institute in Kansas arbeitet. In einigen Projekten in den USA werden verschiedene Arten und Gattungen gekreuzt, um so ausdauernde Sorten von Weizen, Hirse, Mais, Flachs und Sonnenblumen zu entwickeln.

Seit über einem Jahrzehnt untersuchen Forscher der Universität von Manitoba, wie mehrjährige Systeme ihre Ressourcen nutzen. Nun haben auch kanadische Institutionen Programme zur Entwicklung mehrjähriger Getreidesorten aufgelegt. Die Universität von Westaustralien hat inzwischen mit der Zucht von mehrjährigem Weizen begonnen. Und Wissenschaftler am Institut für Nutzpflanzen in Kunming, China, haben die Arbeiten wieder aufgegriffen, die in den 1990er Jahren zur Entwicklung ausdauernden Hochlandreis-Hybriden vom Internationalen Institut für Reisforschung begonnen wurden.

Manchmal nur sterile Hybriden

Am Land Institute beschäftigen sich Pflanzenzüchter sowohl mit der Kultivierung und Kreuzung mehrjähriger Weizengrasarten (vor allem *T. intermedium*, *T. ponticum* und *T. elongatum*) mit einjährigem Weizen. Im Moment testen die Forscher 1500 solcher Hybriden und Tausende ihrer Nachkommen auf ihre Mehrjährigkeit. Die Entwicklung dieser Hybriden ist langwierig und erfordert intensive Laborarbeit. Im ersten Schritt wählen die Züchter Kandidaten für eine Kreuzung aus. Dann müssen sie für den Austausch von Genen zwischen verschiedenen Arten sorgen und erzeugen daraus möglichst viele Kreuzungen. Schließlich selektieren die Wissenschaftler die Nachkommen mit den gewünschten Eigenschaften; zuletzt wiederholen sie diesen Zyklus aus Kreuzung und Selektion immer und immer wieder.

Mit gezielter Kreuzung lassen sich mehrjährige Kulturpflanzen grundsätzlich rascher herstellen als mit Kultivierung. Allerdings ist der technologische Aufwand größer, um genetische Inkompatibilitäten zwischen den Elternpflanzen zu überwinden. Ein Samen aus



CINDY M. COX

Chromosomen einer experimentell gekreuzten mehrjährigen Weizenart sind mit Fluoreszenzfarbstoff markiert. Damit lässt sich feststellen, ob sie von dem Weizengras-Elternteil (grün) oder dem Weizen-Elternteil (rot) abstammen. Mit dieser Technik kann der Wissenschaftler die gewünschten Kombinationen der Chromosomen identifizieren und Anomalien erkennen, zum Beispiel miteinander verschmolzene Chromosomen (Pfeile).

der Kreuzung zweier weit voneinander entfernter Arten wird oft abgestoßen, bevor er voll entwickelt ist. Solch ein Exemplar kann als Keimling gerettet werden, indem man ihn in einem Nährmedium hochpäppelt, bis er erste Wurzeln und Blätter entwickelt. In diesem Stadium bringt man den Sämling in die Erde, wo er nun wie jede andere Pflanze wachsen und gedeihen kann. Sobald er jedoch das fortpflanzungsfähige Alter erreicht, zeigen sich die genetischen Anomalitäten häufig in Form von Unfruchtbarkeit.

Eine Hybride bleibt häufig teilweise oder völlig steril, weil die Chromosomen in seinen Zellen – die ja von unterschiedlichen Elternteilen abstammen – nicht zueinander passen. Das gibt Probleme bei der Reifeteilung (Meiose), bei der die Keimzellen entstehen. In den Körperzellen sind die Chromosomen normalerweise (zumindest bei Wildpflanzen) doppelt vorhanden, Keimzellen dürfen nur den halben Satz enthalten. Eigentlich müssen sich die zueinandergehörigen Chromosomen während der Reifeteilung aneinanderlegen und genetisches Material austauschen. Doch bei Hybriden funktioniert das oft nicht korrekt.

Finden die Chromosomen keinen Partner, weil die beiden Versionen der Elternteile zu unterschiedlich sind oder weil sie unterschiedlich viele Chromosomen haben, dann gerät die Meiose durcheinander. Dieses Problem kann auf verschiedene Weisen umgangen werden: Sterile Hybriden sind normalerweise nicht in der Lage, männliche Keimzellen zu produzieren, während sie teilweise weibliche produzieren können. Bestäubt man sie nun mit einem der Elternteile, kann die Fruchtbarkeit wieder hergestellt werden; dies nennt man Rückkreuzung. Die Verdopplung der Chromosomenzahl – entweder spontan oder durch Zusatzstoffe wie Colchicin – ist eine andere Möglichkeit.

Obwohl jede dieser Methoden die Paarung der Chromosomen ermöglicht, kommt es bei ausdauernden Weizenhybriden in nachfolgenden Generationen oft zu einem Verlust von Chromosomen; dies geschieht besonders häufig mit den Chromosomen vom mehrjährigen Elternteil.

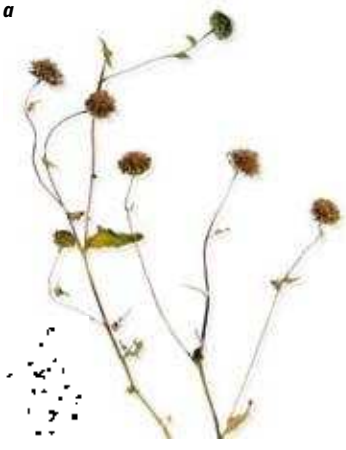
Selektion im Sämlingsstadium

Durch breit angelegte Kreuzungen entstehen riesige Genpools. Deshalb lässt sich mit Hilfe biotechnologischer Techniken bei fertilen, mehrjährigen Hybriden feststellen, welcher Elternteil bestimmte Anteile am Genom der Nachkommen beigetragen hat. Bei der genomischen In-situ-Hybridisierung unterscheidet man zwischen den Chromosomen beider Elternteile etwa durch Farbfluoreszenz und kann auch Anomalien in den Chromosomen entdecken – zum Beispiel strukturelle Umord-

Der nächste Schritt: Wie eine neue Nutzpflanze entsteht

Um mehrjährige Nutzpflanzen mit hohen Erträgen zu entwickeln, können Züchter zum einen eine wilde, mehrjährige Pflanze kultivieren. Zum anderen können sie eine einjährige Sorte mit ihren wilden, ausdauernden Verwandten kreuzen und so ihre Vorzüge kombinieren. Beide Verfahren sind zeitaufwändig und mühsam. Die Vorfahren der Amerikaner benötigten Tausende von Jahren, um durch Kultivierung die kleinfrüchtigen, wilden, einjährigen Sonnenblumen (a) in die bekannte Nutzpflanze (b) zu verwandeln. Sie selektierten und kultivierten Pflanzen mit den gewünschten Eigenschaften wie große Körner und Erträge. Heute wird versucht, die wilden, mehrjährigen Sonnenblumenarten (c) direkt zu kultivieren. Außerdem werden aus den modernen, einjährigen und den wilden, mehrjährigen Sorten (d) Hybriden gezüchtet.

a



wilde, einjährige Sonnenblume

b

kultivierte, einjährige Sonnenblume

c

wilde, mehrjährige Sonnenblume

d

experimentell hergestellte Hybride aus einjähriger Sonnenblume und einer wilden, mehrjährigen Verwandten

THE LAND INSTITUTE

THE LAND INSTITUTE

JIM RICHARDSON

Für die Züchtung von Hybriden muss manchmal der Keimling aus dem Fruchtknoten entnommen werden (links). Ein Wissenschaftler tütet einjährige Hirseköpfe ein, um den Pollen zu sammeln (rechts). Im Hintergrund: hohe, mehrjährige Hirsepflanzen

nungen, also den Austausch von Genen zwischen nicht zueinandergehörenden Chromosomen (siehe Foto ganz links oben). Solche analytischen Techniken können ein Züchtungsprogramm beschleunigen, sobald erwünschte und unerwünschte Kombinationen von Chromosomen entdeckt werden. Sie behindern aber nicht den Einsatz mehrjähriger Nutzpflanzen in der biologischen Landwirtschaft, wo genetisch modifizierte Arten verboten sind.

Eine andere nützliche Methode, um die traditionelle Pflanzenzüchtung zu beschleunigen, ist als markerunterstützte Selektion bekannt. Mit bestimmten Eigenschaften verknüpfte DNA-Sequenzen dienen als Marker, mit denen sich Kreuzungen im Sämlingsstadium auf bestimmte Attribute hin untersuchen lassen. So müssen sie nicht warten, bis die Pflanzen herangewachsen sind (siehe »Uralte Gene für neue Getreidesorten« von S. A. Goff und J. M. Salmeron, Spektrum der Wissenschaft 7/2005, S. 84). Im Moment gibt es noch keine Marker für die Zucht mehrjähriger Pflanzen, aber das ist nur eine Frage der Zeit.

Forscher von der Staatsuniversität Washington haben beispielsweise schon gezeigt, dass bei dem Weizengras *T. elongatum* das Chromosom 4E für eine entscheidende Eigenschaft Mehrjähriger notwendig ist: nämlich für das erneute Wachstum nach einem sexuellen Reproduktionszyklus. Das Eingrenzen der Region auf 4E zu dem Gen oder zu den Genen, die dafür verantwortlich sind, wird zu DNA-Markern führen, die Züchtern künftig ein Jahr Zeit sparen werden.

Mehrjährige Pflanzen sind eine komplexe Lebensform, die ganz sicher von mehr als einer Eigenschaft gesteuert wird und von mehr als einem Gen. Deshalb sind transgene Modifikationen (der Einbau fremder DNA) bei der Entwicklung solcher Nutzpflanzen vermutlich nicht nützlich, zumindest nicht anfangs. Gentechnische Verfahren könnten aber einfache, ererbte Merkmale verbessern. Wenn etwa ein kultiviertes, mehrjähriges Weizengras erfolgreich entwickelt wurde, ihm aber noch die richtige Kombination von Gluten-Genen fehlt (Gluten ist das Klebeeiweiß im Getreide), damit sich mit diesem Weizen auch ein qualitativ gutes Brot backen lässt, dann könnten Gluten-Gene von einem einjährigen Weizen in das Genom der ausdauernden Pflanze eingebaut werden.

Mehrjährige Kulturpflanzen wie Luzerne oder Rohrzucker gedeihen überall auf der Welt, doch werfen sie leider geringere Erträge ab als einjährige. Es erscheint paradox, dass Pflanzen zugleich Energie einsetzen können, um mehrjährige Wurzelsysteme aufzubauen, und dennoch beträchtliche Mengen essbarer Körner produzieren. Der über die Photosynthese gespeicherte Kohlenstoff ist der zentrale Baustoff einer Pflanze, und er muss unter ihren verschiedenen Organen aufgeteilt werden.

Physiologische Tauschgeschäfte

Kritiker der Idee, dass Mehrjährige auch hohe Erträge bringen könnten, zielen oft auf solche physiologischen Tauschgeschäfte ab. Sie nehmen an, dass der Kohlenstoffgehalt einer Pflanze feststeht; damit ginge der Anteil, der den Samen zukommt, immer auf Kosten fester Strukturen – wie eben Wurzeln und Rhizome, das meist unterirdisch oder dicht über dem Boden wachsende Sprossenachsensystem. Zweifler übersehen aber oft die Tatsache, dass die Lebensspanne mehrjähriger Pflanzen ein weites Spektrum umfassen kann. Einige ausdauernde Präriepflanzen mögen 50 oder 100 Jahre überdauern, während andere vielleicht nur ein paar Jahre leben. Zum Glück für Züchter sind Pflanzen relativ flexible Orga-

Mehrjährigkeit ist ein Phänomen, das von mehr als einer Eigenschaft und mehr als einem Gen gesteuert wird

nismen: Als Antwort auf einen bestimmten Selektionsdruck sind sie fähig, den Umfang ihres Kohlenstoffvorrats zu verändern – je nachdem, welche Umweltbedingungen gerade herrschen; außerdem können sie die Aufteilung auf ihre Komponenten variieren.

Angenommen, eine hypothetische, wilde, mehrjährige Art könnte 20 Jahre in ihrer hochkompetitiven natürlichen Umwelt überleben und würde jährlich nur wenig Samen produzieren. Ihre Kohlenstoffration wäre klein, und viel davon benötigte sie für die Abwehr von Schädlingen und Krankheiten, den Kampf um knappe Ressourcen sowie das Überleben unter wechselnden Bedingungen. Versetzen Züchter dieses wilde Exemplar aus seiner kargen natürlichen Umgebung in eine opulentere Umwelt, erhöht sich auf einmal sein gesamter Kohlenstoffspeicher und eine größere Pflanze entsteht.

Mit der Zeit lässt sich auch die Kohlenstoffverteilung innerhalb der größeren Pflanze verändern. Während der Grünen Revolution steigerte die Züchtung modernen Getreides in Kombination mit mehr Dünger den Ertrag vieler einjähriger Getreideernten auf über das Doppelte. Diese Zunahme wurden bei Pflanzen erzielt, die kein mehrjähriges Wurzelsystem versorgen mussten. Züchter erreichten dies zum Teil dadurch, dass sie Pflanzen auswählten, die weniger Stängel- und Blattmasse produzierten und daher mehr Kohlenstoff für die Samenproduktion übrig hatten. Ähnlich können bei mehrjährigen Kulturpflanzen die Erträge gesteigert werden, ohne die Organe und Strukturen zu eliminieren, die zum Überwintern nötig sind.

Tatsächlich bieten viele Mehrjährige, die im Allgemeinen größer sind als Einjährige, sogar ein größeres Potenzial, um das vegetative Wachstum auf die Samenproduktion zu verlegen. Des Weiteren müssen mehrjährige Sorten nur fünf oder zehn Jahre gedeihen können, um die Bedürfnisse der Menschen zu befriedigen.

Man könnte auch sagen: Die wilde, mehrjährige Pflanze ist für den geregelten landwirtschaftlichen Anbau unnötigerweise zu üppig ausgestattet. Ein guter Teil des gespeicherten Kohlenstoffvorrats, der der Pflanze zum Überleben dient – zum Beispiel um auch seltene Dürrekatastrophen zu überleben –, würde der Samenproduktion zugeteilt werden.

Wir könnten uns nun einen Tag in 50 Jahren vorstellen, an dem die Bauern überall über ihre Felder mit mehrjährigen Anbaupflanzen gehen. Dieses Bild hätte Ähnlichkeit mit heutigen Prärien in Kansas, wo Wes Jackson seine Ernte einbringt. Unter der Erde würden verschiedene mehrjährige Wurzeln existieren, die unterschiedliche Bodenschichten nutzen. Die einen würden den langen, zapfenartigen Wurzeln der Luzerne ähneln, die anderen eher den dicken, verfilzten Fasern des Weizengrases. Pflanzen mit unterschiedlichen jahreszeitlichen Wachstumsphasen könnten nebeneinander kultiviert werden, um die Vegetationszeit insgesamt zu verlängern. Weniger Eingriffe durch den Menschen und eine breitere Biodiversität würden sowohl der Umwelt als auch dem Geldbeutel des Landwirts zugutekommen.

Mehrjährige Sorten werden nicht alle Probleme lösen können

Auf der ganzen Welt ändern sich derzeit die Bedingungen für Landwirtschaft, Ökologie, Wirtschaft und Politik so rapide, dass die Entwicklung mehrjähriger Anbaupflanzen Vorteile bieten würde. Agrarsubventionen fördern heute vor allem den Anbau einjähriger Sorten. Da die Subventionspolitik sowohl in den USA als auch in Europa derzeit auf dem Prüfstand steht, könnte die Gelegenheit günstig sein, mehr Gelder in die Erforschung mehrjähriger Pflanzen zu investieren. Wenn außerdem die Energiepreise weiter explodieren und die Kosten für Umweltschäden deutlicher ins Bewusstsein rücken, dann könnte auch die politische Unterstützung für langfristige Projekte wachsen, die den Ressourcen- und Bodenverbrauch reduzieren.

Die langen Zeiträume, die nötig sind, bis mehrjährige Sorten angebaut werden können, entmutigen viele Investoren. Wir brauchen also Finanzierungen mit langen Laufzeiten durch Staaten oder Sponsoren, um die kritische Masse an Forschern und Programmen zu erreichen. Auch wenn die Industrie mit der Produktion mehrjähriger Pflanzen nicht so viel verdienen wird wie mit dem Verkauf von Düngern und Pestiziden, werden sie sich eines Tages mit neuen Produkten und Dienstleistungen an die neue Landwirtschaft anpassen.

Zweifelsohne wird auch noch in 50 Jahren der Anbau von einjährigen Pflanzen wichtig sein – einige Arten, wie zum Beispiel die Sojabohne, werden wahrscheinlich schwer in mehrjährige Sorten umzuwandeln sein. Mehrjährige werden auch Probleme wie Krankheiten, Unkräuter und den Abbau der Bodenfruchtbarkeit nicht völlig lösen. Tiefe Wurzeln bedeuten dennoch Flexibilität und Unverwüstlichkeit. Wurzelt unsere zukünftige Landwirtschaft in mehrjährigen Anbaupflanzen, können die Landwirte wählen, was sie wo anbauen wollen. Sie werden nachhaltiger wirtschaften und so eine rasant wachsende Weltbevölkerung besser ernähren können. ◁

Jerry D. Glover (oben) ist Agrarökologe und Direktor am Land Institute in Salina, Kansas, einer Non-Profit-Organisation, die sich der Lehre und Forschung in nachhaltiger Landwirtschaft widmet. **Cindy M. Cox** ist Pflanzenpathologin und Genetikerin am gleichen Institut. **John P. Reganold** ist Regents-Professor für Bodenkunde an der Staatsuniversität Washington in Pullman.

Perennial grain crops: An agricultural revolution. Von J. D. Glover und W. Wilhelm (Hg.). Sonderausgabe von: Renewable Agriculture and Food Systems, Bd. 20, No. 1, März 2005

Wes Jackson (35 who made a difference). Von C. Canine im Sonderheft von: Smithsonian, Bd. 36, Nr. 8, S. 81, November 2005

Prospects for developing perennial grain crops. Von T. S. Cox et al. in: BioScience, Bd. 56, Nr. 8, S. 649, August 2006

Sustainable development of the agricultural bio-economy. Von N. Jordan et al. in: Science, Bd. 316, S. 1570, 2007

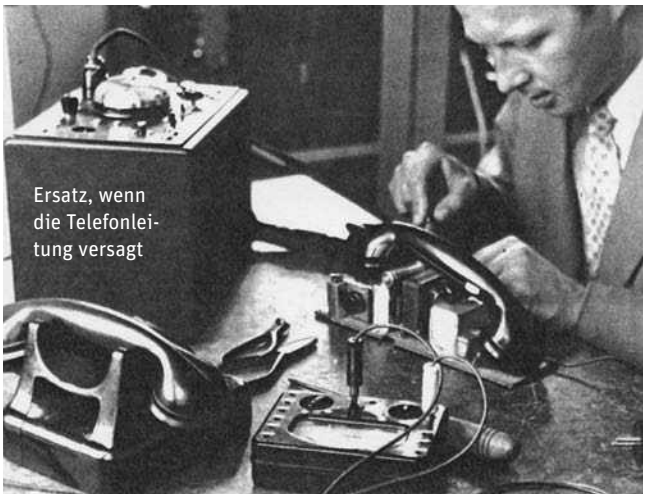
The Land Institute:
www.landinstitute.org

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/910621.

1957

Hunde im All

»Der als Leiter des erfolgreichen russischen Satellitenexperiments bekannt gewordene General … A. A. Blagonrawow berichtet Einzelheiten über die Erforschung der Hochatmosphäre mittels Raketen, besonders die seit 1951 unternommenen Versuche mit lebenden Hunden … Blagonrawow zieht daraus, daß sich während eines Aufenthaltes unter Raketenflugbedingungen bis zu einer Stunde Dauer keine wesentlichen Abweichungen im Verhalten und den organischen Grundfunktionen der Tiere gezeigt haben, den Schluß, daß die physiologische Ungefährlichkeit des Raketenflugs als völlig gesichert gelten kann.« *Naturwissenschaftliche Rundschau, Jg. 10, Heft 12, S. 460, Dezember 1957*



Ersatz, wenn die Telefonleitung versagt

Gefahr durch CO_2-Anstieg

»An der Universität Toronto wurde der elfte Internationale Kongress der Weltunion für Geophysik veranstaltet … Die Gefahren, die sich für die Menschheit durch die ständige Zunahme des Kohlendioxydgehaltes der Luft ergeben, wurden in mehreren Vorträgen behandelt. … Es absorbiert … die Wärme, die von den Festlandmassen der Erde und von den Ozeanen als Folge der Sonneneinstrahlung abgegeben wird, und bewirkt damit ein Ansteigen der Temperaturen, aber auch andere Veränderungen im Klimahaushalt.« *Universitas, Jg. 12, Heft 12, S. 1314, Dezember 1957*

Ferngespräch über Lichtleitung

»Das ›Lichttelefon‹ ersetzt im Augenblick zwar noch keine vollwertige Telefonleitung, bietet aber für Notgespräche eine ausreichende Verständigungsmöglichkeit und Betriebssicherheit … Der Apparat selbst ist ein sogenanntes Wechselsprechgerät, das heißt, es kann nur abwechselnd gesprochen werden … Der Sprechstrom fließt von Teilnehmer A durch den Nulleiter zu Teilnehmer B, in dessen Hörer er in Schallwellen umgewandelt wird. Von Teilnehmer B aus fließt der Sprechstrom zu Teilnehmer A durch den Erdboden zurück.« *hobby, Jg. 5, Nr. 12, S. 44*

Pestizideinsatz im Großformat

Spritzmaschine erleichtert Pflanzenpflege

»Die neue ›Fix‹-Desinfections- und Tünchmaschine bietet nun ein Mittel, alle die für Desinfektion und Reinigung nötigen Arbeiten in bequemer und zweckentsprechender Weise vorzunehmen. Die genannte Maschine arbeitet mit einem Druck von mindestens drei Atmosphären, wodurch das Desinfektions- oder Reinigungsmittel in einem regulären Strahle bis zu einer Entfernung von 6 m getrieben werden kann … Unschätzbare Dienste bietet die Maschine, wenn es sich darum handelt, Obstbäume, Weinspaliere, Gärtnereianlagen usw. von den verschiedenen Insecktenschädlingen zu befreien.« *Deutsche Export-Revue, Jg. 7, Nr. 17, S. 775, 1. Dezember 1907*

Sternschnuppe vermessen

1907

»Die Höhe einer Sternschnuppe wurde durch eine Photographie auf der Sternwarte Königsstuhl bei Hildenberg genau bestimmt. Es wurden zwei Fernrohre, die um 32 Meter von einander entfernt waren, zur Aufstellung gebracht und mit diesen die Spuren der Sternschnuppe photographirt. Aus dem Richtungsunterschiede der Spuren auf den photographischen Platten liess sich die Entfernung der Sternschnuppe vom Beobachtungsort zu 190 Kilometer und ihre Höhe über dem Erdboden zu beiläufig 90 Kilometer ermitteln.« *Photographisches Wochenblatt, Jg. 33, Nr. 50, S. 503, 10. Dezember 1907*

Atomgewicht des Radiums bestimmt

»Dank der Freigiebigkeit M. E. de Rothschilds wurde Frau Curie neuerdings in den Stand gesetzt, 10 Tonnen Joachimsthaler Pechblende zu verarbeiten. Sie gewann daraus 4 Dezigramm Radiumchlorid und es gelang ihr, das Atomgewicht mit grösster Genauigkeit zu bestimmen. Während als Atomgewicht des Radiums bisher 225 galt, stellte es Frau Curie als noch höher, nämlich auf 226,18 fest. … Radium ist auf grund dieser Ergebnisse eines derjenigen Elemente, welche das höchste Atomgewicht besitzen, … nur noch übertroffen vom Thorium mit einem Atomgewicht von 232 und dem Uran mit 239,5 …« *Die Umschau, Jg. 11, Nr. 52, S. 1036, 21. Dezember 1907*

DIE VORFAHREN DER WIKINGER

Im Lauf weniger Jahrhunderte wurde aus Bauern und Häuptlingen ein Volk der Krieger und Könige, verwandelten sich die Germanen des Nordens in die gefürchteten Wikinger.

ALLE ABBILDUNGEN (SOFERN NICHT ANDERS ANGEGEBEN): MICHEL KAZANSKI

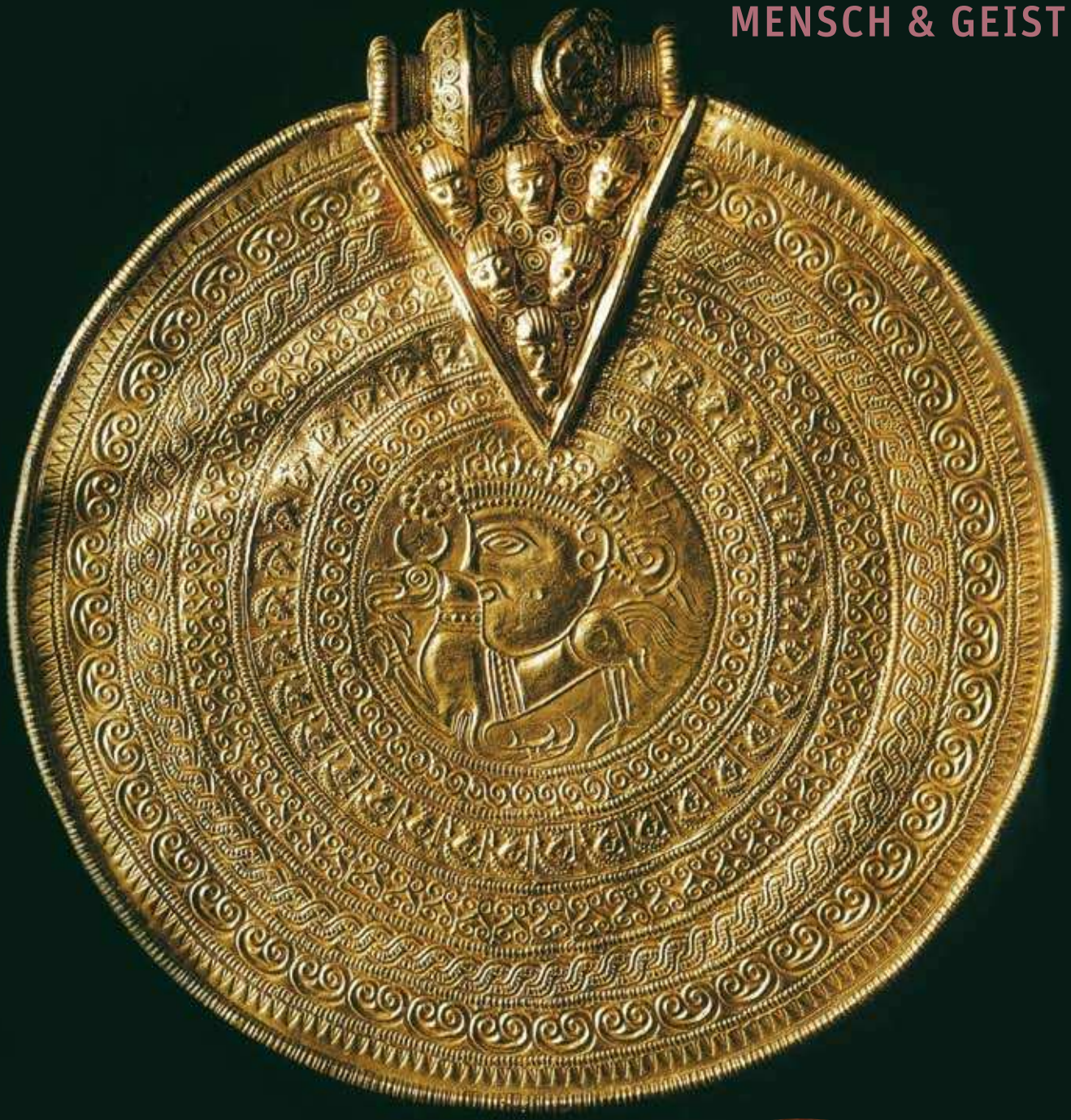
»Die Stämme der Suionen hierauf, an demselben Ozean, sind außer durch ihre Männer und Waffen durch ihre Flotten stark. Die Gestalt ihrer Schiffe unterscheidet sich von den unsrigen darin, dass der Bug stets beidseitig eine zum Landen bereite Front bietet. Sie verwenden weder Segel noch binden sie die Ruder in einer Reihe an den Seiten fest: Lose, wie auf einigen Flüssen, und beweglich liegt das Ruderwerk auf der einen oder der anderen Seite, wie die Lage es fordert.«

»Germania«, Tacitus

Von Michel Kazanski

Juni 793. Dem Kloster von Lindisfarne, einer Insel im Norden Englands, nähert sich ein fremdes Schiff. Noch während die Mönche darüber rätseln, ob sie Händler oder Pilger empfangen werden, springen Krieger an Land. Wie Berserker fallen sie über das Kloster her, töten, plündern und brennen den entweihten Ort anschließend nieder. Die Kunde von der Freveltat verbreitet sich im ganzen Abendland. Ein neuer Feind ist scheinbar aus dem Nichts aufgetaucht: die Wikinger. Von England bis nach Spanien, von Gibraltar bis zum Kaspischen Meer fürchtet man nun die Drachenboote, die selbst an flachen Ufern anlegen können und weit auf den Flüssen vordringen. Von den nebligen Gestaden des Nordens sind die Nordmänner aufgebrochen, Europa in Angst und Schrecken zu versetzen, heidnische Krieger ohne Gnade.

Dass dies Klischee war, dass sich die Wikinger auch auf die Landwirtschaft und den Handel verstanden, mitunter aus Abenteuerlust, mal aber aus wirtschaftlicher Not auf Beutezug gingen, wissen Mittelalterexperten seit einigen Jahren. Ausgrabungen, Untersuchungen von Skeletten und das Studium der historischen Berichte wie der nordischen Sagas zeichnen ein differenzierteres Bild. Weniger gut bekannt ist bislang die Entwicklung dieses »Volks«. Keinesfalls erschien es urplötzlich aus dem Nichts. Europa kannte es seit Langem – als die im Norden lebenden Germanen. Über einen Zeitraum von mindestens acht Jahrhunderten entwickelte sich dort eine Adelsgesellschaft, wurden aus friedlichen Stämmen kriegerische Königreiche.



Die monumentalen Grabhügel Alt-Uppsalas (links oben) bargen, so die Vermutung der Archäologen, einst die Überreste der Ynglinger, der ersten schwedischen Könige.
Römische Medaillons inspirierten zu diesem goldenen Amulett (oben), das im schwedischen Schonen ausgegraben wurde. Wie der kostbare Halsring aus Tureholm (rechts) war es eine Meisterleistung nordgermanischer Handwerkskunst.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

Das ursprüngliche Siedlungsgebiet der Germanen erstreckte sich vom Rhein bis zur Weichsel. Umfangreiche Waffenopferungen im heutigen Dänemark deuten Archäologen als Hinweise auf Kriege und Schlachten im 3. Jahrhundert n. Chr. Vermutlich wurde das Land von Südskandinavien aus immer wieder angegriffen.

Im Moor von Illerup kam die Ausrüstung einer ganzen Armee zum Vorschein (links), die besiegt ihre Waffen und Rüstungen abliefern musste, darunter auch ein Schildbuckel (Mitte) und ein Schwertknauf (rechts).

Die germanischen Völker betraten »offiziell« um 113 v. Chr. die Bühne der Geschichte: Als die Kimbern und Teutonen in Gallien einfielen, forderten sie das Römische Reich heraus und hielten Einzug in die Annalen antiker Chronisten. Als Heimat der Stämme gilt Jütland im heutigen Dänemark, als wahrscheinlichste Gründe für den Zug Landnot, Klimaverschlechterungen und Sturmfluten. Diese Völker bereits als Germanen zu bezeichnen und damit von den in Mitteleuropa lebenden Kelten zu unterscheiden, wäre aber noch eine Frage der Übereinkunft. Zwar erwähnte schon der griechische Gelehrte Poseidonios (135–51 v. Chr.) die *Germanoi*, ließ sich aber nicht näher über deren Heimat aus. Erst der Gallieneroberer Gaius Iulius Caesar (100–44 v. Chr.) differenzierte zwischen beiden Völkern, wobei ihm der Rhein als Trennlinie dient.

Dies war zwar vor allem politisch motiviert, kam aber nicht von ungefähr: Zum einen assoziierten Caesars keltische Verbündete die Germanen mit einer anderen Lebensweise und Religion. Zum anderen gab es jenseits des Rheins durchaus ein gewisses Gefühl der Zusammengehörigkeit, denn die germanischen Stämme führten sich auf Mannus zurück, den Sohn des Erdgottes Tuisto. Leider existiert keine Überlieferung, wie sich diese Völker selbst nannten. Insgesamt aber zeigen Archäologie und Sprachforschung eher vage kulturelle Unterschiede zu den Kelten.

Als Wiege der Germanen gilt ein ausgedehntes Gebiet zwischen Rhein und Weichsel (Polen), denn dort erkennen Linguisten drei Varianten einer altgermanischen Sprache: Das Westgermanische war an den Ufern des Rheins gebräuchlich, Ostgermanisch im Weichselbecken und an der Ostseeküste, das nordgermanische Idiom wurde im heutigen Norddeutschland und Dänemark gesprochen. Schweden und Norwegen gehörten nicht zur Kernzone, in diese Gebiete expandierten die Nordgermanen erst während des Mittelalters, wobei sie die ursprüngliche Bevölkerung nach Norden verdrängten, wo ihre Nachkommen, die Samen beziehungsweise Lappen, noch heute leben.

Einzelne Gehöfte und Dörfer prägten die Landschaft Altgermaniens. Archäologen identifizierten auch übergreifende kultische Bündnisse. Zum Beispiel verehrten die »Söhne der Nerthus« unabhängig von ihrer Zugehörigkeit zu einem Dorf die Erdmutter Nerthus in einem gemeinsamen Heiligtum entweder auf der dänischen Insel Fünen oder auf Seeland.

Der Wagen der Göttin wurde dort in einem heiligen Hain aufbewahrt. Bei sakralen Festumzügen behängte man ihn mit Tüchern, um die Gottheit zu verbergen. Publius Cornelius Tacitus (55–116 n. Chr.), römischer Staatsmann und Historiker, schrieb dazu in seiner »Germania«: »Der Wagen, die Tücher und, wie man glaubt, die Göttin selbst wurden in einem abgelegenen See gebadet.« Dies sei Sache von Sklaven gewesen – die man anschließend ertränkte.

Bronze und Silber für die Gräber der Hochrangigen

Diese einfach strukturierte Gesellschaft kannte noch keine differenzierte Hierarchie. Wann begann sie, sich in soziale Schichten aufzuspalten? Die einzigen verlässlichen Hinweise liefern Gräber aus dem 1. und 2. Jahrhundert unserer Zeitrechnung. Deren Ausstattung lässt jeweils erkennen: Hier wurde ein Hochrangiger bestattet. Ein kostbares Geschirr aus Bronze oder Silber wurde sicher keinem einfachen Bauern mit ins Jenseits gegeben, eine Grabkammer für den Leichnam sicher keinem Gemeinen errichtet, der erhielt eine Feuerbestattung. Waren diese Toten Stammesoberhäupter oder Priester? Wir wissen es nicht, doch solche Gräber kamen in jenen Jahrhunderten in Nordgermanien in Gebrauch.

Im 3. Jahrhundert begann dort offenbar jene Entwicklung, die das Klischee vom wilden Wikingerkrieger begründete: eine Militarisierung der Gesellschaft. Den Göttern erbeutetes Kriegsgerät darzubringen war schon länger Brauch, der älteste Fundort Hjortspring auf der dänischen Insel Alsen datiert auf das 4. Jahrhundert v. Chr. Doch 700 Jahre später nimmt die Zahl der Waffenopferungen sprunghaft zu.

Vor allem der Fundort Illerup bringt Licht ins Dunkel der Geschichte. In diesem östlich von Jütland gelegenen Tal erforschen der dänische Archäologe Jorgen Ilkjaer und sein deutscher Kollege Claus von Carnap-Bornheim ein Moor, das einst ein recht großer See war – über ein Drittel ist inzwischen ausgegraben. Dabei kamen etwa 15 000 Objekte zum Vorschein, Gebeine, Holz- und Keramikfragmente, insbesondere aber mehr als 1400 Lanzen und Speere sowie etwa 450 Schwerter. Schon jetzt wird deutlich, dass dort zu Beginn des 3. Jahrhunderts n. Chr. die Bewaffnung einer mehrere hundert Mann starken Truppe zu Ehren der Götter versenkt worden ist. Angesichts der zu jener Zeit geringen Bevölkerungsdichte in Nordeuropa handelte es sich offenbar um das Inventar einer ganzen Armee! Und Illerup war nicht der einzige Opferort. Ein knappes Dutzend weiterer Darbringungen aus der ersten Hälfte jenes Jahrhunderts sind in der Meerenge des Kattegats östlich von Jütland, auf der Insel Fünen und auf der Insel Seeland entdeckt worden.

Die berühmten Nydam-Schiffe, von denen der Kopenhagener Archäologe Conrad Engelhardt das erste im Jahr 1863 ausgegraben hat, veranschaulichen die hohe soziale Stellung der nordgermanischen Krieger. In diesem Moorgebiet auf der Insel Alsen waren drei vor allem mit Waffen beladene Schiffe zerschlagen und versenkt worden, um die Götter zu ehren. Anhand von Wachstumsringen der verwendeten Hölzer datierten Dendrochronologen die

In Kürze

- Die Wikinger entwickelten sich aus nordgermanischen Stämmen, die ursprünglich im heutigen Norddeutschland und Dänemark beheimatet waren.
- Ab dem 3. Jahrhundert bildete sich infolge von Kriegen eine militärisch organisierte Gesellschaft. Ihre Elite gliederte sich immer feiner auf, bis Vorformen des Wikinger-Königtums entstanden.

Auch in Ostjütland wurden Darbringungen oft recht luxuriöser Waffen endeckt. Die Mehrzahl von ihnen war zunächst mit Hämmern und Äxten zerstört und dann im heiligen See versenkt worden, wie diese Gürtelschnallen (unten links) und der Schwertknauf (rechts).

Die drei Schiffe von Nydam bilden den bedeutendsten Bootsfund Nordeuropas aus der Zeit vor den Wikingern. Das am besten erhaltene Exemplar – hier eine Zeichnung des Entdeckers Conrad Engelhardt – war in Klinkerbauweise, also aus überlappenden Planken gezimmert worden.

Schiffe auf das Jahrzehnt um 220 n. Chr. Das größte Gefährt war mehr als zwanzig Meter lang und über drei Meter breit, es konnte etwa vierzig Mann Besatzung aufnehmen und taugte mit seinem hochgezogenen Bug für die Fahrt über das raue Meer.

Waffen- und Schiffsopferungen lassen nur einen Schluss zu: Das 3. Jahrhundert war von Kriegen gekennzeichnet, damals rangen rivalisierende Mächte um die Vorherrschaft in der Region. Vermutlich verschlechterte sich das Klima, die Lebensbedingungen wurden härter und Hunger trieb die Menschen im Norden Europas auf Beutezug. Stammten einige der eroberten und geopferten Waffen im 2. Jahrhundert dem Stil nach noch aus dem heutigen Norddeutschland, taucht nun auch Kriegsgerät aus Norwegen auf. Dem dänischen Archäologen Jorgen Ilkjaer zufolge war beispielsweise das Gebiet des Kattegats um das Jahr 200 n. Chr. ständigen Attacken ausgesetzt.

Ohne Planung, Logististik und Bereitstellung von Ressourcen wäre die Verteidigung eines Territoriums gegen ganze Armeen nicht möglich gewesen. Das aber erforderte auch einen klaren Anführer. Die kleinen bäuerlichen Gemeinschaften mit ihren flachen Hierarchien hatten offenbar gut organisierten Gruppen Platz gemacht, die im Kriegsfall von einem Häuptling beziehungsweise Clanchef befehligt wurden. Dieser war vermutlich auch mit kultischen, administrativen und wirtschaftlichen Funktionen wie der Verteilung von Nahrung betraut. Des Weiteren mussten Mensch und Material in ausreichendem Maß zur Verfügung stehen; sicherlich gab es also auch eine Hierarchisierung der Gesellschaft nach Sippen, Dörfern und Familien. Musste in einem kleinen Weiler noch jeder alles können, entwickelte sich innerhalb größerer Gemeinden eine Spezialisierung nach Berufen wie Bauer, Handwerker, Priester und Krieger.

Von der Völkerwanderung verschont

Eine solche Gesellschaftsordnung beruht auf Traditionen, Gewohnheitsrechten und dem Prestige des Anführers und seines Clans. Komplexe Strukturen können sich ausbilden, in denen mehrere Gemeinden mit eigenen Häuptlingen einer zentralen Siedlung unterstehen, deren Anführer allen anderen befehlen kann. Erst in diesem Stadium der Entwicklung kristallisiert sich gemeinhin eine echte Führungsschicht heraus. Erst sie kann einen

Zur Zeit der Völkerwanderung, Ende des 4. bis zum 5. Jahrhundert, genoss die Elite Nordgermaniens allerlei Luxus, wie ein Goldkollier aus Möne in Nordschweden bezeugt. Den 823 Gramm schweren Schmuck bilden sieben mit Zierbändern aus Goldfäden besetzte Röhren und nicht weniger als 458 fein ziselierte Dekorelemente.

militärischen Feldzug planen und durchführen, wie er um 200 n. Chr. im Gebiet des Kattegats stattfand. Die großen germanischen Stämme, von denen Tacitus berichtet hat, besaßen zweifellos derart komplexe Strukturen.

Während das spätantike Römische Reich Ende des 4. Jahrhunderts durch die Völkerwanderung aus den Fugen geriet, blieb Skandinavien vom Ansturm der Hunnen, Goten, Vandalen, Burgunder, um nur die bekanntesten zu nennen, verschont. Vielmehr expandierten die Nordgermanen bis zur Polarzone und erschlossen im Inneren Skandinaviens neue Gebiete. Die Pioniere errichteten Langhäuser, die dreißig bis neunzig Meter maßen, wohl die effektivste Siedlungsstrategie in der oft rauen Landschaft. Untersuchungen an Skeletten der zugehörigen Friedhöfe bestätigen, dass Großfamilien in diesen abgelegenen Regionen eine zentrale wirtschaftliche und soziale Rolle spielten.

Die Führungseliten hatten ihre herausragende Stellung offenbar weiter ausgebaut, das verraten jedenfalls die großen »königlichen« Grabhügel. Der Tumulus von Ragnehaugen

Der Helm von Valsgärde: Sehschlitze und die Andeutung eines Furcht einflößenden Gesichts sind typisch für die Ausrüstung skandinavischer Krieger des 6. bis 8. Jahrhunderts. Kettenringe, die von den Rändern herabhingen, schützten die untere Hälfte des Kopfes.

Neuerscheinungen

In **Sterne und Weltraum** beschreiben Experten ihres Faches für Sie monatlich das faszinierende Geschehen im All. Themen der aktuellen Ausgabe sind: Gammastrahlenausbrüche: Die stärksten Explosionen; Neue Weltsichten – Galileis Weg vom Bild zum Begriff; Kometen – inkl. CD-ROM »Tempolimit Lichtgeschwindigkeit«!
Sterne und Weltraum kostet € 7,90 im Einzelheft, als Jahresabonnement € 85,20 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 64,–)

Vielleicht ist ein Schwarzes Loch nichts weiter als eine ungeheure Zusammenballung an »verschluckter Information«, und die dynamische Entwicklung eines physikalischen Systems ist in unzählige Wechselwirkungen kleinster digitaler Elemente aufzulösen – eben das, was man in einem Computer »elementare Rechenakte« nennt? Neue Ideen dieser Art geben Anlass zu aufregenden Spekulationen über das Wesen unseres Universums. Das Sonderheft **»Ist das Universum ein Computer?«** gibt die Vorträge des gleichnamigen Symposiums wieder, das am 6. und 7. Nov. 2006 im Deutschen Technikmuseum in Berlin stattfand; € 8,90.

Bestellen können Sie unter
www.spektrum.com

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

Wie gelangten byzantinische Münzen nach Schweden? Archäologen vermuten, dass Händler aus dem Süden damit bezahlten. Vielleicht waren die Silberstücke aber auch Lohn germanischer Söldner im oströmischen Dienst.

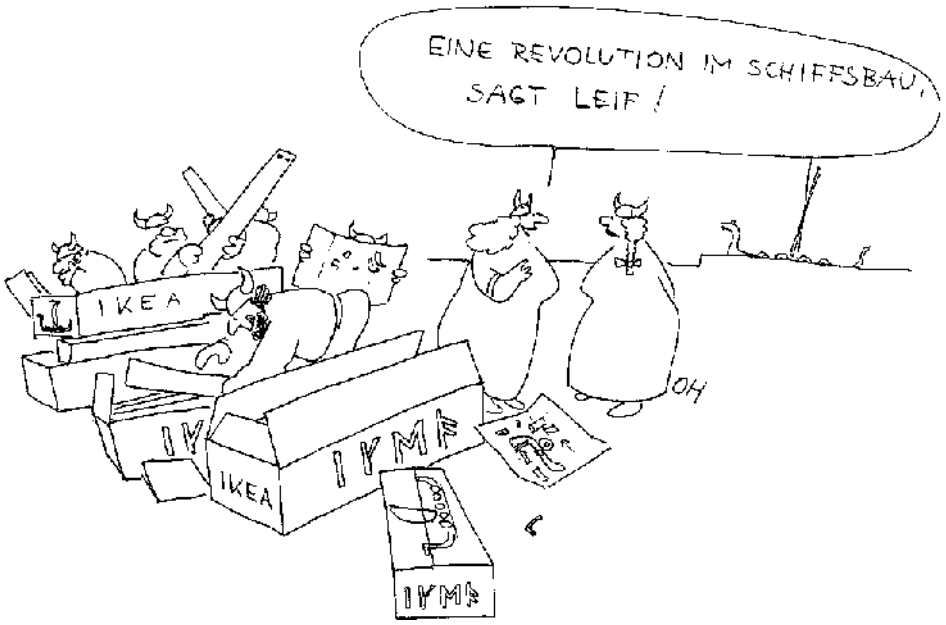
beispielsweise, der größte Norwegens, ist 15 Meter hoch und hat einen Durchmesser von 95 Metern. Anhand von Holzresten wurde er auf die Mitte des 6. Jahrhunderts n. Chr. datiert. Ihn zu errichten hielt vermutlich fünfhundert Männer während des ganzen Sommers von anderer Arbeit ab – wer sonst hätte einen solchen Bau als Grablege anordnen können als ein Fürst in einer hierarchisch gegliederten Gesellschaft?

Auch im schwedischen Gebiet von Medelpad entstanden solche Tumuli. So erhoben sich im 5. Jahrhundert in Högom vier große Grabhügel und einige kleinere. Bis auf einen waren alle im Lauf der Zeit geplündert worden, doch dieser eine verriet viel über die Bestattungsriten der Nordgermanen. In seinem Zentrum befand sich die fünf mal zwei Meter große, aus Balken errichtete und mit Felsblöcken abgedeckte Grabkammer. Dem Toten waren Schwert, Schild, Lanze und andere Waffen mitgegeben worden, auch ein Pferdegeschirr, Werkzeuge, kostbare Gefäße und schließlich ein Holzstab, den schwedische Archäologen als Symbol der Macht deuten.

Einen weiteren Beleg für die Ausbildung einer Elite von Fürsten innerhalb der Kriegerschicht geben die im 5. und 6. Jahrhundert vergrabenen Schätze. Es brauchte Macht, um so viel Reichtum zu erwerben. In Dänemark stammen die größten Goldfunde dieser Epoche von den Inseln Lolland und Seeland sowie aus dem Osten und Norden Jütlands. Kostbarkeiten wurden aber auch in Schweden vergraben. Dass die Noblen ihren Reichtum zur Schau trugen, beweisen goldene Zierscheiben, so genannten Brakteaten. Sie waren römischen Vorbildern nachempfunden und dienten als Amulette.

Schwedische Anführer verdankten ihr Gold und Geld einem enormen wirtschaftlichen Aufschwung: Der Ostseehandel verlagerte sich von den dänischen Inseln Seeland und Fünen auf die schwedischen Öland, Bornholm und Gotland. Das verraten Schriften wie die des im 6. Jahrhundert lebenden Historikers Jordanes sowie Hunderte von römischen und byzantinischen Goldmünzen auf den letztgenannten Inseln. Felle, Eisen und Amber wurden von dort über die Ostsee nach Russland verschifft, wo sie über verzweigte Flusssysteme nach Westen und nach Konstantinopel gelangten. Mittelschweden verwandelte sich sogar in ein exportorientiertes Zentrum der Eisenproduktion.

Und doch: In jener Zeit des florierenden Handels unternahmen Nordgermanen historischen Berichten zufolge auch erste Eroberungszüge in das angrenzende Europa. So attackierten die norwegischen Heruler zwischen 455 und 459 Küstenorte der Iberischen Halbinsel, Angeln und Jüten schlossen sich um 430 der sächsischen Eroberung Britanniens an. Die Dänen überfielen im folgenden Jahrhundert Galliens Küste, berichtete Gregor, Bischof von Tours (etwa 538–594) – der dänische König Chlochilaich sei damals von



den Franken getötet worden. Für Militäroperationen im Ostseeraum existieren keine schriftlichen Belege, doch Waffen- und Grabfunde in Estland und Pommern verweisen nach Skandinavien. Auseinandersetzungen würden auch erklären, warum der »Zustrom« römischer und byzantinischer Münzen nach Skandinavien in jener Zeit offenbar abriss.

Mal Kaufmann, mal Krieger – ein nordisches Geschäftsmodell

Auch wenn der Handel eine große Bedeutung für die nordgermanischen Stämme und ihre Eliten hatte, stand das Kriegshandwerk nach wie vor hoch im Kurs. Wirkliche Friedenszeiten hat es nie gegeben, das Nebeneinander von Handel und Raubzug dürfte den Menschen damals selbstverständlich erschienen sein. An Grabfunden des 6. Jahrhunderts lässt sich erkennen, dass sich die oberen sozialen Schichten weiter differenziert hatten. So ließen sich manche Clanchefs einäschern und anschließend in einem Tumulus bestatten, wie dem »Grab des Ottar« unweit von Uppsala. Andere hingegen wurden in Booten beigesetzt, die Reichtümer für die letzte Reise an Bord hatten: Dolche, Helme, Rüstungen, aber auch Gewänder und Stoffe, Küchengeräte und Essgeschirr. Solche Bootsgräber waren bis Mitte des 8. Jahrhunderts gebräuchlich.

Doch selbst sie verblassen im Vergleich zu den monumentalen Tumuli, die Alt-Uppsala überragten, einst vermutlich Hauptstadt und sakraler Mittelpunkt Schwedens. Drei Grabhügel mit sechzig bis siebzig Meter Durchmesser und neun bis zwölf Meter Höhe wurden von Experten den Ynglinger-Königen zugeordnet, der ersten schwedischen Dynastie. Zwei dieser Grablegen – Västhögen und Östhögen – wurden im 19. Jahrhundert von Forschern ergraben. An ihrer Basis kam eine Holzkonstruktion zum Vorschein, die mit Lehm bedeckt und von Steinen umgeben war, zudem fand man Schichten mit Ascheresten, die auf Feuerbestattungen hinweisen. Waffen, Schmuck, Tafelgeschirr, Werkzeuge und Möbel waren ebenfalls verbrannt worden, auch Knochen von Pferden, Kühen, Hunden, Schafen und Ziegen fand man in der Asche. Kürzlich hat der polnische Archäologe Wladyslaw Duczko diese beiden Tumuli anhand eines Prunkschwerts und verschiedener Zierelemente auf das Ende des 6. oder auf den Beginn des 7. Jahrhunderts datiert. Laut dem Chronisten Adam von Bremen (um 1050–1085) grenzte ein Heiligtum an die Grabhügeln, bestehend aus einem sakralen Hain sowie einer Thingstätte, also einem Ort für Volksversammlungen und Gerichtsbarkeit. Diese enge Verzahnung politischer und religiöser Funktionen unterstreicht die Bedeutung des Ortes und damit der dort Beigesetzten für das schwedisch-germanische Reich, das dem Reichtum der archäologischen Funde nach in jener Zeit eine dominierende Rolle in Skandinavien spielte.

An seiner Spitze standen in der Zeit vor den Wikingern die Könige von Uppsala, im Rang darunter die in den Bootsgräbern bestatteten Fürsten einzelner Gaue. Wie bei einer Häuptlingsgemeinde stützte sich die Machtausübung der Könige auf Gewohnheitsrecht und Charisma. Geschriebenes Recht sowie die zu seiner Durchsetzung notwendigen Institutionen wie etwa ein Justizwesen fehlten, sodass man noch nicht von einem Staat sprechen kann. Von komplexen Häuptlingsgemeinden unterschied sich ein solches Gebilde aber insofern, als die Zugehörigkeit zu Stämmen und Gemeinden immer weniger den Rang einer Person bestimmte, stattdessen war seine Zugehörigkeit zum Gefolge des Königs entscheidend. Eine größer werdende Zahl an Fürsten brachte weitere gesellschaftliche Dynamik. Dies und Ressourcenverknappung infolge einer stark angewachsenen Bevölkerung waren wichtige Gründe für die nordgermanischen Krieger, von den Gestaden ihrer Heimat aufzubrechen und als Wikinger auf Beutezug zu gehen. ◁

Michel Kazanski ist Forschungsbeauftragter des Centre national de la recherche scientifique (CNRS) und im Centre d'histoire et civilisation de Byzance beim Collège de France tätig.

Die Germanen. Von Ernst Künzl. Theiss Wissen Kompakt, Stuttgart 2006

Die Welt der Wikinger. Von Arnulf Krause. Campus, Frankfurt/New York 2006

Iron-age societies: From tribe to state in Northern Europe, 500 BC to AD 700. Von Lotte Hedeager und John Hines in: The American Historical Review, Bd. 99, Heft 1, Februar 1994, S. 208

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/910601.

European Union Contest for Young Scientists 2007

Aus der bunten Vielfalt der Beiträge aus allen Ländern Europas und einigen Gastländern wird hier über fünf herausragende Projekte berichtet.

Von Josephina Maier

Manche der Jungforscher sind im Anzug gekommen. Immerhin ist der Anlass hinreichend feierlich: Ausgelesen von den jeweiligen nationalen Gremien und auf den Wettbewerb auf europäischer Ebene entsandt, sollen sie im futuristischen Museum Príncipe Felipe in Valencia vor einer international besetzten Jury Rede und Antwort stehen. Aber die meisten sind in Jeans und T-Shirt da – immerhin hat es Mitte September dieses Jahres fast dreißig Grad – und wirken auch sonst ganz normal.

FLUIDDYNAMIK

Florian Ostermaier (19) und Henrike Wilms (20) präsentieren das Experiment, mit dem sie schon bei »Jugend forscht« in diesem Jahr einen 1. Preis gewannen. In etwa eineinhalb Meter Höhe über der Grundplatte tropft Wasser aus einer Pipette. Ihrem Teampartner Florian, so erklärt Henrike, sei bei der Begehung einer Tropfsteinhöhle aufgefallen, dass die von der Decke fallenden Wassertropfen das Licht eines Strahlers nicht durchgehend, sondern in einem bestimmten Rhythmus reflektieren. Als die beiden Schüler die Situation mit einer Taschenlampe am Wasserhahn nachstellten, fanden sie heraus, dass das Licht in einem bestimmten Winkel zum Betrachter auf die Wassertropfen fallen muss, damit das Phänomen auftritt. Genaueres Nachsehen mit einer drehbaren Lichtquelle, einer Kamera und Hintergrund aus Millimeterpapier brachte die Bestätigung: Bei einem Winkel von etwa 42 Grad zwischen Kamera und Lichtquelle traten zuverlässig die unterbrochenen Lichtblitze auf, die Florian in der Höhle beobachtet hatte.

»Leider konnten wir auf diese Weise aber nicht sehen, was mit dem Tropfen selbst passiert«, erklärt Henrike. Die Jugendlichen versetzten ihr Wasser also mit Milch – und siehe da, es ließen sich drei Formen erkennen, die der Tropfen im Verlauf seines Falls mehrere Male periodisch durchläuft: die »gequetschte«, die gewöhnliche und die »gestreckte« Kugel. Florian und Henrike simulierten daraufhin diese Formen mitsamt der Lichtreflexion in einem Computerprogramm – und konnten die Bilder reproduzieren, die Florian und Henrike bereits zuvor mit einer Hochgeschwindigkeitskamera festgehalten hatten. Für die unterbrochenen Lichtblitze war also die Oszillation des fallenden Tropfens verantwortlich.

Optisch war das Phänomen damit erklärt, mechanisch aber noch lange nicht: Bis Henrike und Florian auf die Young-Laplace-Gleichung stießen, mit deren Hilfe sie den Innendruck der drei Trop-

Die deutschen Preisträger: Henrike Wilms und Florian Ostermeier mit ihrem Wassertropfenexperiment (links); Raphaël Errani mit seiner Untersuchung zur Einschlagwahrscheinlichkeit von Asteroiden (rechts)

FLUIDDYNAMIK

ASTRONOMIE

EUROPÄISCHE UNION 2007

ALLE FOTOS (SOFERN NICHT ANDERS ANGEGEBEN): JOSEPHINA MAIER

COMPUTERBAKTERIEN

Tatyana Pushkareva aus Russland untersuchte den Bakterienbefall auf Schulcomputern.

fenformen errechnen konnten, dauerte es eine Weile. Die Jungforscher fanden sogar einen Weg, die Oszillationsfrequenz des Tropfens in Abhängigkeit von seiner Oberflächenspannung und Masse zu berechnen. Ganz nebenbei machte Henrike das Abitur – ihr Kommentar dazu: »Nebenbei ist das richtige Wort.«

ASTRONOMIE

So ganz nebenbei hat auch Raphaël Errani (17) die Einschlagwahrscheinlichkeit von Asteroiden auf die Erde bestimmt. Fotografieren lässt sich der rothaarige Jungforscher gar nicht gerne, die Prozedur musste er aber auch schon bei »Jugend forscht« über sich ergehen lassen. Dort gewann er den Preis für die originellste Arbeit und die Einladung nach Valencia.

Hinter Raphaëls Projekt steckt eine bestechend einfache Idee: Im Gegensatz zur Erde gibt es auf dem Mond mangels Atmosphäre keine Erosion, die Einschlagkrater hätte einebnen können. Raphaël zählte also auf Fotos Krater aus und bestimmte durch Hochrechnen zunächst die Häufigkeit von Asteroideneinschlägen auf dem Mond.

Allerdings haben den Erdtrabanten seit seiner Entstehung vor rund 4,4 Milliarden Jahren so viele Asteroiden getroffen, dass ihre Krater sich teilweise überdecken. Diese Fehlerquelle berücksichtigte Raphaël, indem er kurzerhand ein Programm schrieb, das auf einer definierten Fläche zufällig Krater entstehen lässt. Mit der so ermittelten Überdeckungsrate erstellte er eine Korrekturfunktion, die seine durch Auszählung entstandenen Werte etwas nach oben verschob.

Erst jetzt konnte er zum Hauptteil seiner Arbeit schreiten: In einer weiteren, diesmal dreidimensionalen Simulation ließ er Asteroiden mit geringfügig variierten Startgeschwindigkeiten ins Erde-Mond-System eintreten – und schaute erst einmal, was passiert. »Logischerweise wird entweder die Erde oder der Mond oder keiner von beiden getroffen«, erklärt er in Valencia. Im Computerraum seiner Schule ließ er das Programm an 29 PCs über elf Tage laufen und konnte so 650 000 verschiedene Asteroidenbahnen simulieren. Am Ende hatten etwa fünfzehnmal so viele simulierte Asteroiden die Erde getroffen wie den Mond, obgleich deren Oberfläche nur 13,4 mal so groß ist. Offensichtlich lenkt sie durch ihre größere Gravitation mehr Asteroiden auf sich, als ihr flächenmäßig »zustehen«. Mit diesem Verhältnis konnte Raphaël aus den Werten für den Mond die Wahrscheinlichkeit eines Einschlags auf der Erde in Abhängigkeit vom Kraterdurchmesser errechnen.

COMPUTERBAKTERIEN

Computer spielten auch beim Projekt von Tatyana Pushkareva (17) eine Rolle, allerdings die des Bösewichts: Die Russin testete die mikrobiologische Belastung auf Tastatur und Maus sowie in der Luft in der Nähe von Schul-PCs. Was sie durch simple Schmierproben herausfand, jagte ihr nach eigener Aussage zunächst richtig Angst ein: Auf den Nährböden ihrer Petrischalen wuchsen Krankheitserreger wie das Darmbakterium *Escherichia coli* genauso munter wie Geflechte der – weniger gefährlichen – Actinomyzeten. Zusätzlich zu diesen beiden Hauptgruppen wies Tatyana noch eine große Anzahl anderer Mikroorganismen nach, und zwar in deutlich höherer Konzentration als außerhalb des Computerraums. Merkwürdigerweise war während der Benutzung des PCs die Konzentration der Mikroorganismen verschwindend gering und stieg erst danach drastisch an. Offensichtlich hält die elektromagnetische Strahlung *E. coli* und Co. während des Betriebs vom Computerbildschirm fern.

Nachdem die junge Russin auf dieses bisher weit gehend unbekannte Problem gestoßen war, suchte sie auch gleich nach einer Lösung – und fand sie in den Wäldern ihrer Heimat. Ihr Biologielehrer hatte die antimikrobielle Wirkung der Nadeln von Nadelbäumen erklärt. Tatyana kombinierte sofort: Wenn die dafür verantwortlichen Duftstoffe, Phytonzide genannt, Pflanzen vor dem Schädlingsbefall bewahren konnten, würden sie vielleicht auch die Schulcomputer schützen. Tatsächlich ergaben einige in Wasser eingelegte Nadeln eine messbar wirksame Lösung. Gemeinsam mit einem saugfähigen Sticker bietet die Jungforscherin die Phytonzidlösung jetzt als Reinigungsset an.

SELBSTVERTEIDIGUNG DER PFLANZEN

Ebenfalls mit Duftstoffen hat sich der Ungar Márton Spohn (18) beschäftigt. »Als ich vor einer Weile in einem Ferienlager Pflanzen sammelte, fiel mir auf, dass manche Blätter einen stechenden Duft verbreiteten, wenn ich sie zerrieb«, erzählt der Jungforscher. »Der Geruch war sehr chemisch, nicht so, wie man es von einer Pflanze erwarten würde.« Das Kraut war das Echte Herzgespann *(Leonurus cardiaca)* aus der Familie der Lippenblütler, und der Duftstoff, so war in der Fachliteratur zu lesen, diene der Selbstverteidigung der Pflanzen gegen Fressfeinde und werde bei Angriffen

PFLANZENDUFTSTOFF

Der Ungar Márton Spohn entdeckte einen bislang unbekannten Reaktionsweg für einen pflanzlichen Abwehrstoff.

FUSSTASTATUR

Kein Zeitvertreib, sondern Schreiben mit den Füßen: Yingqi Wu aus China hat ein Computereingabesystem entwickelt, das ohne Hände auskommt.

blitzschnell freigesetzt. Es handele sich um das Prämarrubiin, ein Terpenoid, das im Stoffwechsel vieler Lippenblütler als Sekundärmetabolit anfällt.

An der Stelle wurde der Jugendliche stutzig. Dieser Stoff erschien ihm mit einer Molekülmasse von 332 Gramm pro Mol viel zu schwer, um den flüchtigen Charakter eines Duftstoffs entwickeln zu können. Außerdem wusste er, dass Prämarrubiin in Lippenblütlern permanent und sehr langsam synthetisiert wird; auch das passte nicht zu einer schlagartigen Freisetzung der Duftstoffe. Mártons Experimente bestätigten seine Zweifel. Er konnte in keinem der Pflanzenextrakte, die er aus dem Echten Herzgespann herstellte, flüchtiges Prämarrubiin finden.

Für ihn stand damit fest: Das Molekül musste vor seiner Freisetzung als geruchsaktive Substanz noch eine Modifizierung durchlaufen. Allerdings führt die einzige Reaktion des Terpenoids, die Márton in der Literatur beschrieben fand, zum Produkt Marrubiin. Dabei erfährt das Prämarrubiin-Molekül eine einfache Umstrukturierung an seinem Furanring, einem aromatischen Fünfring aus einem Sauerstoff- und vier Kohlenstoffatomen. Weil auch die Molekülmasse des Marrubiins für einen Duftstoff noch zu groß war, konnte es sich dabei nicht um die Reaktion handeln, die Márton suchte.

Auf den ersten Hinweis stieß der Jungwissenschaftler, als er seine Pflanzenblätter in einem leicht sauren Medium reagieren ließ: Unter dieser Bedingung entstand auffallend wenig Marrubiin. Márton vermutete, dass es für das Prämarrubiin noch einen zweiten Reaktionsweg geben müsse; dabei könnte es sich um den Beginn der gesuchten Umstrukturierungskette zum Duftstoff handeln. Beim Beleg dieser Theorie half ihm ein Computerprogramm, das mögliche Reaktionen des Prämarrubiins im sauren Medium simulierte. Es stellte sich heraus, dass neben dem Marrubiin tatsächlich ein zweites Reaktionsprodukt möglich ist – noch dazu eines, das den Furanring statt über eine Einfachbindung über eine viel reaktivere Doppelbindung mit dem Restmolekül verbindet.

Von dieser Entdeckung bis zum fertigen Reaktionsschema war es dann nicht mehr weit: Über eine Kette von Enzymreaktionen kann vom neu entdeckten Reaktionsprodukt des Prämarrubiins der ehemalige Furanring abgespalten werden, der endlich die gewünschten Eigenschaften für einen Duftstoff aufweist. Aufgrund seines aromatischen Charakters und seines geringen Molekulargewichts verdunstet er schnell und verursacht so den stechenden Geruch. Als sich Márton zum Schluss noch die Pflanzenblätter unter dem Lichtmikroskop anschaute, fand er auf ihrer Rückseite gehäuft tentakelartige Strukturen, aus denen bei Stress eine ölige Substanz austritt. Damit war der Selbstverteidigungsprozess des Echten Herzgespanns endgültig aufgeklärt: Das kontinuierlich entstehende Prämarrubiin sammelt sich in den Tentakeln, wo auch die später benötigten Enzyme schon bereitstehen. Wird die Pflanze etwa durch Blattläuse angegriffen, stellt sie ein leicht saures Milieu her, in dem das Prämarrubiin nicht nur zu Marrubiin, sondern auch zu einem zweiten Molekül reagiert. Mit diesem treten die Enzyme in Wechselwirkung und spalten letztendlich das ölige, flüchtige Furanderivat ab.

FUSSTASTATUR

Während ihre jugendlichen Kollegen aus Europa an ihren Ständen den Jurymitgliedern ihre Projekte erläutern, kann sich Yingqi Wu (17) aus China entspannen: Sie ist wie die Teilnehmer aus den USA nur als Gast hier und nimmt nicht an der Preisvergabe teil. In aller Ruhe spielt sie das Computerspiel »Zuma«, eine Art weiterentwickeltes Tetris. Erst auf den zweiten Blick bemerkt man, dass sie dabei keine Tastatur benutzt – und die scheinbare Pausenbeschäftigung in Wirklichkeit eine eindrucksvolle Demonstration ihres Projekts ist.

Unter Yingqis Füßen befinden sich drei Pedale, mit deren Hilfe sie ihr Computerspiel lässig bedient. Mit ihren Mitschülern Cong Xiu (17) und Shenyuan Liu (15) hat sie dieses System als Tastaturersatz für behinderte Menschen entwickelt, die ihre Hände nicht zur Bedienung des Computers verwenden können. Ein Kodesystem repräsentiert jede Taste auf der Tastatur durch eine dreistellige, aus den Ziffern 1 bis 3 zusammengesetzte Zahl. Auf den Pedalen gibt es für diese Ziffern quietschbunte Knöpfe. Als Ersatz für die Maus dient ein mit dem Fuß bedienbares Touchpad, zusätzlich gibt es Knöpfe für Leer-, Enter- und Löschtaste. Die wenigen Eingabetasten reichen mit etwas Übung vollkommen aus, um den Computer zu bedienen – wie man an Yingqi sieht, die gerade ihre Zuma-Partie gewinnt.

Bei der Preisverleihung später wird der Präsident der Jury die Projekte der außereuropäischen Gastländer besonders loben. Er wird außerdem die Neugier als einen für Forscher unerlässlichen und grundsätzlichen Charakterzug hervorheben, den sie alle teilen: Raphaël, der eine Hospitanz bei der European Space Agency (Esa) gewinnt und nun doch wieder vor die Kameras muss, Márton, Florian und Henrike, die jeweils den ersten, mit 5000 Euro dotierten Preis mit nach Hause nehmen, und auch Tatyana, die leer ausgeht. Um die Preisgelder geht es aber ohnehin nicht, wie die deutschen Gewinner nach ihrer ersten Pressekonferenz überzeugend darlegen: Viel mehr freuen sie sich darüber, an der Nobelpreisverleihung in Stockholm teilnehmen zu dürfen. Jetzt müssen sie erst mal weiter – gleich geht ihr Flug zurück nach Deutschland. Noch nicht nach Hause, sondern zunächst nach Berlin: zum Empfang bei der Bundeskanzlerin. ◁

Josephina Maier ist freie Journalistin in Darmstadt.

AUTORIN

SPINTRONIK MIT DIAMANT

Künftig wird die Elektronik nur die Ladung der Elektronen nutzen, sondern auch deren Spin. Als ideales Material für solche Quantengeräte bietet sich Diamant an.

Von David D. Awschalom, Ryan Epstein und Ronald Hanson

WAS DIE SPINTRONIK ERMÖGLICHT:

- sehr hohe Speicherdichte auf Festplatten
- nichtflüchtige Speicherchips
- bei Einschalten sofort weiterarbeitende Computer
- Chips, die Daten zugleich speichern und verarbeiten
- schnellere Chips, die weniger Energie brauchen
- Chips mit logischen Gattern, die beliebig verändert werden können
- Quantenkryptografie und Quantencomputer bei Zimmertemperatur

Diamant zeichnet sich durch extreme Eigenschaften aus – äußerste Härte, höchste Wärmeleitfähigkeit und Transparenz für ultraviolette Strahlung. Zudem erweist er sich als attraktives Material für die Festkörperelektronik, seit es gelingt, höchst reine synthetische Einkristalle zu züchten und sie gezielt mit nützlichen Fremdatomen zu dotieren. Reiner Diamant ist ein Nichtleiter, aber durch Dotierung wird daraus ein Halbleiter mit ungewöhnlichen Merkmalen. Daraus wiederum können Detektoren und Licht emittierende Dioden in der Ultraviolett-Optik hervorgehen sowie extrem leistungsstarke Apparate für die Mikrowellen-Elektronik. Doch besonders interessant finden viele Forscher die Anwendung von Diamanten für die so genannte Spintronik. Als Fernziel winken brauchbare Quantencomputer mit ungeahnter Rechenkapazität sowie hochsicherer Datentransfer.

Die Spintronik macht sich nicht nur die elektrische Ladung der Elektronen zu Nutze wie die herkömmliche Elektronik, sondern auch eine Eigenschaft namens Spin, durch die sich Elektronen wie winzige Stabmagneten verhalten. Heute enthält fast jeder Computer bereits die erste kommerzielle Anwendung der Spintronik. Seit 1998 verwenden die Leseköpfe der Festplatten einen spintronischen Effekt, den Riesenmagnetowiderstand, um die mikroskopisch kleinen magnetischen Bereiche auf der Platte zu entdecken, welche die Einsen und Nullen der darauf gespeicherten Daten repräsentieren. Die Entdeckung dieses Effekts wurde in diesem Jahr mit einem Nobelpreis ausgezeichnet (siehe dazu auch S. 18).

Ein anderes spintronisches Gerät, das Sie in einigen Jahren auf neuen Computern finden werden, ist das MRAM (*magnetoresistive random-access memory*, Magnetowiderstandsspeicher mit wahlfreiem Zugriff). Wie eine

KENN BROWN

Werden Fehlstellen in synthetischen Kohlenstoffkristallen mit Laserlicht angeregt, emittieren sie Photonen in spezifischen Quantenzuständen – eine Voraussetzung für die Übertragung von Quanteninformation.

Festplatte speichert ein MRAM die Daten als Magnetisierung und darum »nichtflüchtig« – das heißt, sie gehen nicht verloren, wenn der Rechner abgeschaltet wird. Das Auslesen geschieht elektrisch wie bei jedem anderen Speicher, der mit Ladungen arbeitet (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2002, S. 28). Die zum Motorola-Konzern gehörende Firma Freescale Semiconductor verkauft seit 2006 den ersten MRAM-Typ.

Quantencomputer als Wunschziel

Nichtflüchtige Speicherchips ermöglichen Rechner, die ihre Programme nicht bei jedem Einschalten umständlich von der Festplatte laden müssen. Der Computer fährt binnen Sekundenbruchteilen dort fort, wo er aufgehört hat – wie heutige Laptops –, weil alle nötigen Programme und Daten im Chip bereitliegen.

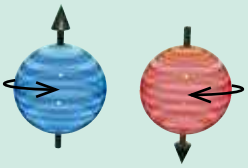
Weiter fortgeschrittene Technologien – zum Beispiel Spintransistoren, die über den Spin Ströme steuern – sind noch im frühen Forschungsstadium; sie ermöglichen Computerchips, deren logische Schaltkreise sich nach Belieben neu konfigurieren lassen.

Leseköpfe und MRAM-Chips gehören zu einer Klasse von Spintronik-Bauteilen, in denen die Spins zahlreicher Elektronen gleichsinnig ausgerichtet sind – wie eine Ansammlung von Spielzeugkreiseln, die sich alle im Uhrzeigersinn drehen. Wenn diese so genannten spinpolarisierten Elektronen auf vorgezeichneten Bahnen durch das Gerät fließen, bilden sie einen spinpolarisierten Strom oder kurz Spinstrom, der viel mit einem polarisierten Lichtstrahl gemein hat. In den letzten Jahren sind damit viele interessante Fortschritte erzielt worden; Forscher haben entdeckt, wie man Spinpolarisation in Halbleitern erzeugen und manipulieren kann, ohne magnetische Materialien oder klobige Drahtspulen zum Erzeugen eines magnetischen Felds zu brauchen. Insbesondere haben wir und andere Teams ein dafür sehr nützliches Phänomen namens Spin-Hall-Effekt beobachtet (siehe Kasten S. 116).

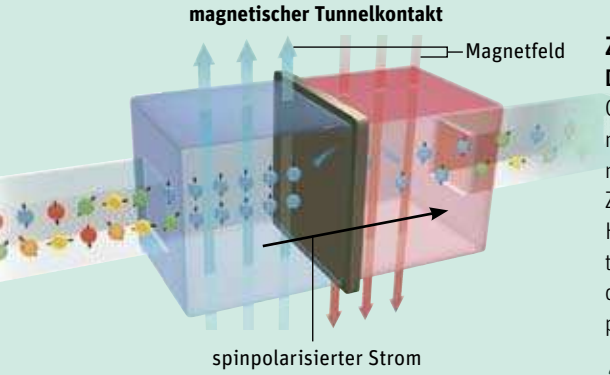
Was ist Spin und wozu kann er dienen?

Was ist Spin?

Außer Masse und elektrischer Ladung haben Elektronen einen quantisierten Eigendrehimpuls, den Spin. Insofern gleichen sie winzigen rotierenden Kugeln.



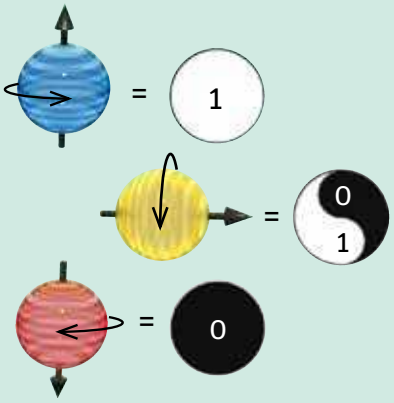
Die Physiker stellen den Spin als Vektor dar, der Rotationsachse und Drehsinn angibt.



Zwei Arten von Spintronik

Die erste Klasse spintronischer Geräte nutzt spinpolarisierte Ströme, in denen die Spins der Elektronen gleichsinnig ausgerichtet sind. Zu solchen Bauteilen – bereits im Handel erhältlich – zählen magnetische Tunnelkontakte, in denen die Elektronen durch Magnetfelder polarisiert werden (links).

Die zweite Klasse steuert einzelne Elektronen, um damit Quantenbits – Qubits – zu repräsentieren und Quanteninformation zu verarbeiten. Wenn »Spin aufwärts« eine Eins bedeutet und »Spin abwärts« eine Null, stellt ein gekippter Elektronenspin eine Quantensuperposition von Null und Eins dar. Solche Bauteile sind noch im frühen Versuchsstadium – unter anderem als Spintronik auf Diamantbasis.



JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Viel weiter von kommerzieller Anwendung entfernt ist die zweite Klasse, die Quanten-Spintronik; hier geht es darum, einzelne Elektronen zu manipulieren, um die Quanteneigenschaften des Spins zu nutzen. Damit lassen sich vielleicht eines Tages wirklich Quantencomputer bauen; sie arbeiten nicht wie herkömmliche Rechner mit eindeutigen Nullen und Einsen, sondern mit Quantenbits oder kurz Qubits (sprich Kjubits), das heißt mit komplexen Superpositionen von Null und Eins (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/2003, S. 48).

Quantencomputer sollen mit Superpositionen von Qubits eine Art Parallelverarbeitung ausführen, die für gewisse Aufgaben ungemein effektiv wäre, etwa um Datenbanken zu durchforsten und riesige Zahlen in Faktoren zu zerlegen. Das Streben nach wirksamer Faktorisierung ist ein beliebter Sport, denn damit ließen sich die gängigen kryptografischen Codes knacken, die unter anderem den Datenaustausch per Internet sichern. Geheimdienste, Polizei oder Privatfirmen kämen mit einem genügend großen Quantencomputer in die Lage, unzählige vermeintlich geheime Botschaften nach Belieben zu entschlüsseln.

Vielleicht am wichtigsten wäre die einzigartige Fähigkeit eines künftigen Quantencomputers, andere Quantensysteme zu simulieren – eine Aufgabe, bei der heutige Computer eine hoffnungslos schlechte Figur machen. Quantensimulationen werden beispielsweise gebraucht, um das Verhalten der Materie im Nanometerbereich (millionstel Millimeter) zu verstehen; das würde enorme Fortschritte in Physik, Chemie, Materialwissenschaften und Biologie nach sich ziehen.

Hochbegehrt: Ein Kristall mit kleinen Fehlern

Diese faszinierenden Aussichten haben einen weltweiten Wettlauf nach dem brauchbarsten System zum Speichern und Verarbeiten von Quanteninformation ausgelöst. Die fortgeschrittensten Einheiten zur Quanteninformationsverarbeitung sind derzeit wohl Spins von Ionen, die durch elektromagnetische Felder fixiert werden. Doch diese Systeme haben einen Nachteil: Sie brauchen ein Ultrahochvakuum und komplizierte Einfangvorrichtungen, um die einzelnen Partikel fest- und von Störungen fernzuhalten. Die Entwicklung von Chips, die viele solcher Fallen tragen, ist eine äußerst schwierige Aufgabe. Hingegen könnten die Forscher bei Festkörper-Qubits, die direkt in einem festen Substrat ruhen, auf jahrzehntelanger Erfahrung mit der Fabrikation von Halbleiterchips aufbauen.

Dennoch wirft auch ein Festkörper-Quantencomputer viele Fragen auf: Lassen sich Spins in Festkörpern einzeln ansteuern? Können die Forscher passende Wechselwirkungen anbieten, mit denen quantenlogische Gatter zuverlässig funktionieren? Vermögen Spins in Festkörpern die Quantendaten lange genug aufrechtzuerhalten, um eine brauchbare Anzahl von Operationen mit diesen Daten zu garantieren? In den letzten Jahren sind all diese Fragen positiv beantwortet worden. Überraschenderweise erwies sich als besonders viel versprechendes Grundmaterial ein Edelstein, der sonst eher für kostbare Juwelen begehrt ist – der Diamant.

Der Festkörper, den wir in unseren Experimenten verwenden, sieht freilich dem funkelnden Schmuckstück im Juwelierladen gar nicht ähnlich. Heutzutage lassen sich dünne

Diamantfilme – meist nur einige hundert Nanometer dick, aber manchmal viele Quadratzentimeter groß – durch chemische Dampfabscheidung synthetisieren. Bei diesem Prozess wird ein Gas aus kohlenstoffhaltigen Molekülen – oft Methan – und Wasserstoff durch intensive Mikrowellenstrahlung in einzelne Atome aufgespaltet; die Kohlenstoffatome lagern sich dann auf einem Siliziumsubstrat ab. Der dadurch gebildete Diamant kann extrem rein sein, besteht aber oft aus vielen kleinen Kristallen, deren Korngröße je nach den Bedingungen in der Kammer zwischen Nano- und Mikrometern (millionstel bis tausendstel Millimetern) schwankt. Optimale optische und elektronische Qualitäten haben nur Einkristalle, denn bei ihnen wird das charakteristische tetraedrische Gitter aus Kohlenstoffatomen nicht durch ungeordnete Korngrenzen unterbrochen.

Eine für die Quantenelektronik wichtige Eigenschaft von Diamant ist, dass die Freisetzung eines Elektrons, das durch das Material zu wandern vermag, einen hohen Energiebetrag erfordert. Die Physiker veranschaulichen die erlaubten Zustände der Elektronen im Festkörper durch Energiebänder, die eine Art Stufenleiter mit ungleich verteilten Sprossen bilden. Bei Halbleitern sind zwei Bänder wichtig: das Valenzband, sozusagen die höchste Sprosse, auf der noch Elektronen sitzen, und das leere Leitungsband gleich darüber, in dem die Elektronen sich frei bewegen können. Die Größe des Energieabstands zwischen diesen beiden Bändern – die Bandlücke – beträgt bei Diamant 5,5 Elektronenvolt; das ist doppelt so viel wie die Energie eines Photons im optischen Strahlungsbereich und das Fünffache der Bandlücke von Silizium.

Normalerweise können Elektronen in einem Halbleiter keine Energie haben, die in der Bandlücke liegt, doch durch hinzugefügte Fremdatome entstehen mitunter diskrete Zustände in der Lücke – gleichsam zusätzliche dünne Leitersprossen. Bei Diamant ist die Lücke so groß, dass zwei Zustände hineinpassen, deren Abstand der Energie eines optischen Photons entspricht. Darum vermag

In Kürze

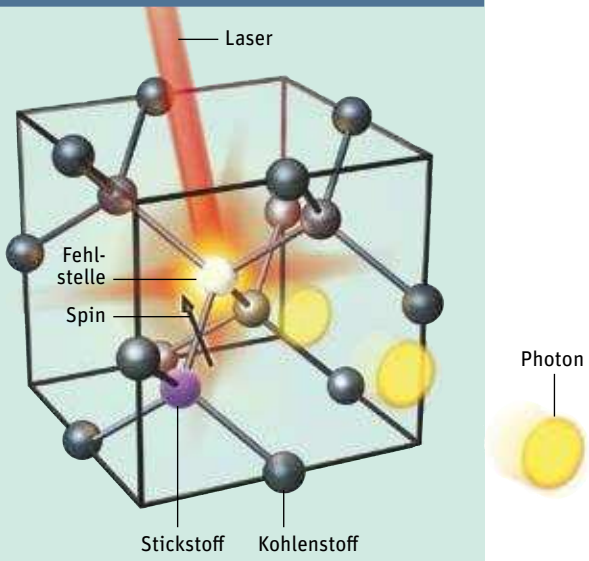
- **Elektronen tragen Ladung und Spin**, doch nur die Spintronik nutzt beide Eigenschaften, um neue elektronische Bauteile zu ermöglichen.
- Die **Spintronik** beschert uns schon heute Leseköpfe für Festplatten sowie nichtflüchtige Speicherchips – und vielleicht morgen Computer mit variablen Prozessoren, die beim Einschalten sofort weiterarbeiten.
- **Synthetische Halbleiter-Diamanten** könnten die Basis für eine künftige Ära der Quanten-Spintronik bilden, die Spins manipuliert und Quantencomputer bei Zimmertemperatur ermöglicht.

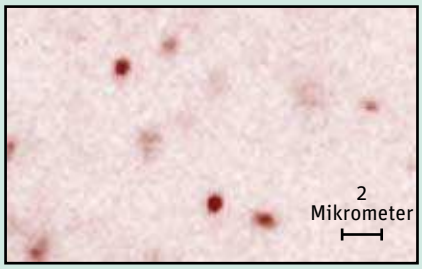
Das NV-Zentrum: Zaubertricks mit Fremdatomen und Fehlstellen

Wie bei Halbleitern in der herkömmlichen Elektronik wird Diamant mit Fremdatomen dotiert, um damit Quanten-Spintronik zu betreiben. In diesem Fall ist der erwünschte Kristalldefekt ein Stickstoff-Fremdatom plus Fehlstelle, ein so genanntes NV-Zentrum (NV für *nitrogen-vacancy*).

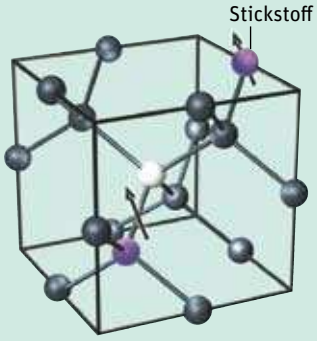
Beim NV-Zentrum sind zwei benachbarte Plätze des tetraedrischen Diamantgitters aus Kohlenstoffatomen verändert: ein Stickstoffatom sitzt an der Stelle eines Kohlenstoffs und gleich daneben klafft eine Leerstelle. Elektronenbahnen umschließen die Fehlstelle und die nächsten vier Atome; diese Elektronen tragen einen Spin, der sich für Quanteninformation nutzen lässt.

Beispielsweise kann ein Laser ein Elektron am NV-Zentrum wiederholt so anregen, dass es jedes Mal beim Zurückfallen in seinen unangeregten Zustand ein einzelnes Photon in einem bestimmten Quantenzustand emittiert. Forscher haben auf diese Weise mit Diamant Prototypen für die Quantenkryptografie erprobt, die auf einen stetigen Zustrom einzelner Photonen angewiesen ist.





Werden NV-Zentren mit einem Laser intensiv bestrahlt, erscheinen sie als helle Punkte (im Foto rot). Zentren mit Spin im Zustand Eins sind viel heller als solche im Spinzustand Null. Radiowellen einer präzise eingestellten Frequenz schalten die NV-Zentren zwischen Null und Eins hin und her; dazwischen gibt es Übergangszustände, das heißt Quantensuperpositionen von Null und Eins.



Durch Einfügen eines zweiten Stickstoffatoms nahe dem NV-Zentrum entsteht ein System aus zwei gekoppelten Qubits, das als logisches Gatter funktioniert. Die zum Umschalten des Qubits im NV-Zentrum nötige Frequenz liegt nun ein wenig tiefer oder höher, je nach dem Zustand des zweiten Stickstoffs. Darum vermag eine Welle der höheren Frequenz das NV-Qubit nur umzuschalten, wenn das andere Qubit Eins ist. Diese Operation heißt kontrolliertes NICHT-Gatter; aus solchen CNOT-Gattern lassen sich beliebige Rechenschritte in Quantencomputern aufbauen.

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Steuerung von Spinströmen mit dem Spin-Hall-Effekt

Von Yuichiro K. Kato

Auf Grund ihres Spins verhalten sich Elektronen wie winzige Stabmagneten. Das macht sich die Spintronik auf zwei Arten zu Nutze. Die eine Klasse von Bauteilen manipuliert den Spin einzelner Elektronen (wie im Artikel beschrieben); die andere kontrolliert große Gruppen spinpolarisierter Elektronen, die als so genannte Spinströme durch Halbleiter wandern.

Ich hatte das Glück, an entscheidenden Fortschritten in der Steuerung von Spinströmen mitzuwirken, während ich von 2000 bis 2005 als Student zu David D. Awschaloms Team an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara gehörte. Insbesondere fanden wir neue Methoden, die Spinpolarisierung zu erzeugen und zu manipulieren. Dabei beobachteten wir erstmals den Spin-Hall-Effekt, mit dem sich Elektronen je nach ihrer Spinrichtung sortieren und lenken lassen.

Weil Spins sich wie kleine Magneten benehmen, werden sie durch äußere Magnetfelder beeinflusst. Doch um Magnetfelder zu erzeugen, braucht man üblicherweise magnetische Materialien oder äußere Magneten. Besser wären elektrische Felder: Sie ermöglichen kleinere, schnellere Spintronik-Bauteile, die leichter herzustellen sind, denn elektrische Felder lassen sich besser auf kleine Gebiete beschränken und mit hohen Frequenzen – die schnellere Operationen zulassen – einfacher erzeugen. Leider reagieren Spins wie alle Magneten normalerweise nicht auf elektrische Felder.

Ein relativistischer Effekt kam uns zu Hilfe: Elektronen, die sich senkrecht zu einem elektrischen Feld bewegen, erfahren zusätzlich ein schwaches Magnetfeld – und das beeinflusst den Elektronenspin. Diese Wechselwirkung heißt Spinbahnkopplung, weil die Physiker sie zunächst an den Bahnelektronen im elektrischen Feld der Atomkerne studierten.

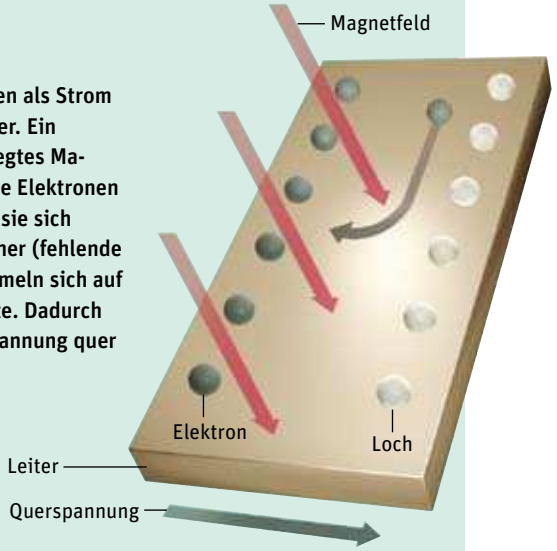
Unser Team untersuchte diesen Effekt anfangs bei Galliumarsenid, einem in der Elektronik häufig genutzten Halbleiter. Wenn wir Pakete spinpolarisierter Elektronen durch das Material bewegten, drehten sich die Spins wie in einem Magnetfeld. Dieses Phantomfeld vermochte zudem die Spins unpolarisierter Elektronen auszurichten.

Die Spinbahnkopplung verursacht auch den Spin-Hall-Effekt, den Mikhail Dyakonov und Vladimir Perel vom Ioffe-Institut in Leningrad schon 1971 vorhergesagt hatten. Der Name erinnert an den ursprünglichen, 1879 von Edwin Hall entdeckten Effekt, bei dem entgegengesetzte Ladungen sich an den Seiten eines Materials aufbauen, durch das unter dem Einfluss eines Magnetfelds ein Strom fließt (rechts oben). Beim Spin-Hall-Effekt sammelt sich eine kleine Spinpolarisation an den Rändern eines stromdurchflossenen Materials, ohne dass ein Magnetfeld im Spiel ist (rechts unten). Dieser Effekt vermag auf nichtmagnetische Weise Spinpolarisation zu erzeugen und Elektronen gemäß ihrer Spinorientierung zu lenken.

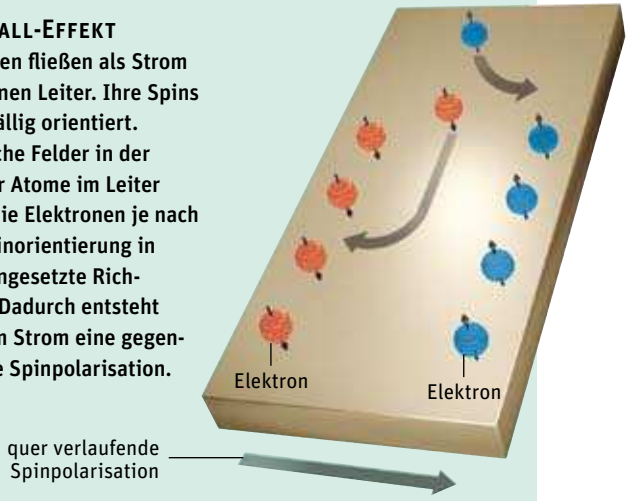
Ende 2004 beobachteten mein Mitstudent Robert C. Myers, Arthur C. Gossard, Awschalom und ich die erhoffte Spinpolarisation an den Rändern eines auf 30 Kelvin gekühlten Galluimarsenid-Plättchens. Einige Monate später erzeugte ein Team um Jörg Wunderlich am Hitachi-Labor in Cambridge den Spin-Hall-Effekt mit Elektronen und Löchern (fehlenden Elektronen). Im Herbst 2006 demonstrierte die Gruppe um Awschalom schließlich den Effekt bei Zimmertemperatur im Halbleiter Zinkselenid.

All diese Entdeckungen eröffnen faszinierende Chancen für die Entwicklung einer Halbleitertechnologie, die Spins statt Ladungen manipuliert.

Yuichiro K. Kato *ist Dozent am Institut für Technikinnovation der Universität Tokio.*



Hall-Effekt
Elektronen fließen als Strom durch einen Leiter. Ein senkrecht angelegtes Magnetfeld lenkt die Elektronen zur Seite ab, wo sie sich ansammeln. Löcher (fehlende Elektronen) sammeln sich auf der anderen Seite. Dadurch entsteht eine Spannung quer zum Strom.



Spin-Hall-Effekt
Elektronen fließen als Strom durch einen Leiter. Ihre Spins sind zufällig orientiert. Elektrische Felder in der Nähe der Atome im Leiter lenken die Elektronen je nach ihrer Spinorientierung in entgegengesetzte Richtungen. Dadurch entsteht quer zum Strom eine gegensätzliche Spinpolarisation.

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

sichtbares Licht ein Elektron in der Nähe eines Fremdatoms von einem diskreten Zustand zu einem anderen anzuregen, ohne es gleich bis ins Leitungsband hinaufzustoßen. Wenn das Elektron in seinen tieferen Energiezustand zurückfällt, emittiert es ein Photon, dessen Frequenz dem Abstand der Energieniveaus entspricht; dieser Vorgang heißt Fluoreszenz. Bei kontinuierlicher Beleuchtung wiederholen sich optische Anregung und spontanes Zurückfallen immer wieder von Neuem, und ein Fremdatom vermag Millionen Photonen pro Sekunde zu emittieren. Als eine Gruppe um Jörg Wrachtrup an der Technischen Universität Chemnitz 1997 entdeckte, dass einzelne Defekte in Diamant auf diese Weise fluoreszieren, begannen zahlreiche Forscher mit dem optischen Nachweis solcher Defekte zu experimentieren.

Der spezielle Defekt, den Wrachtrups Team entdeckte, bestand aus einem Stickstoff- an Stelle eines Kohlenstoffatoms plus einer benachbarten Fehlstelle, an der normalerweise Kohlenstoff sitzt; Forscher sprechen von einem NV-Zentrum (NV für *nitrogen-vacancy*, Stickstoff-Fehlstelle). Beim NV-Zentrum in Diamant spielt interessanterweise die Fehlstelle eine entscheidende Rolle; der Defekt verhält sich völlig anders als ein einzelnes Stickstoffatom ohne benachbarte Lücke. Die Elektronen im NV-Zentrum beschreiben Bahnen, welche die Fehlstelle und deren drei Kohlenstoffnachbarn umgeben, und verbringen nur wenig Zeit in der Nähe des Stickstoffs. Wegen dieser molekülartigen Orbits verhält sich das NV-Zentrum praktisch wie ein einzelnes Fremdatom – und nicht wie eine seltsame Kombination aus Stickstoffatom und Leerstelle.

Einzeldefekte wie das NV-Zentrum emittieren ein Photon nach dem anderen; dies ist für das künftige Gebiet der Quantenkryptografie eine entscheidende Voraussetzung (siehe »Datenschutz mit Quantenschlüsseln« von Gary Stix, Spektrum der Wissenschaft 5/2005, S. 68). Quantenkryptografische Systeme übertragen Information in Form einzelner Photonen, die jeweils ein Bit repräsentieren. Die Gesetze der Physik garantieren, dass ein Spion die Photonenbotschaft nicht mitlesen kann, ohne die Qubits in einer Weise zu stören, die dem legitimen Empfänger auffallen muss. 2002 konstruierten Philippe Grangier und seine Mitarbeiter am Institut für Optik in Orsay (Frankreich) den ersten Prototyp eines solchen Systems mit einer gepulsten Quelle einzelner Photonen. Dieser Durchbruch beruhte auf einer extrem stabilen und zuverlässigen Einzelphotonenquelle – einem NV-Zentrum in Diamant.

Die Elektronen des NV-Zentrums tragen einen Spinzustand, der sich mit optischem Licht bequem polarisieren lässt. Während andere Spinsysteme in Festkörpern zu diesem Zweck sehr tief gekühlt werden müssen, geht der Spin des NV-Zentrums schon bei Zimmertemperatur und optischer Beleuchtung bereitwillig in einen spezifischen Spinzustand über. Außerdem entdeckte man bald, dass einer der Spinzustände viel heller fluoresziert als alle anderen. Auf diese Weise kann die Fluoreszenzintensität zum Auslesen des Spinzustands dienen – hell für Eins, schwach für Null.

Dauerhafte Quantendaten

Seit einigen Jahren perfektioniert unsere Gruppe an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara ein bildgebendes Verfahren mit Einzelphotonen, um einzelne Spinrichtungen zu beobachten und zu manipulieren. Damit haben wir untersucht, wie einzelne Spins mit ihrer Umgebung – dem Diamant – wechselwirken, und konnten indirekt so genannte dunkle Spins in Diamant beobachten, das heißt Stickstoff-Fremdatome ohne benachbarte Fehlstelle, die an sich für optische Detektoren unsichtbar bleiben.

Vor allem stellte sich dabei heraus, dass Spins in Diamant extrem stabil gegen Umwelteinflüsse sind. Das NV-Zentrum verhält sich sogar bei Zimmertemperatur als Quantenobjekt. Normalerweise werden Quantenphänomene durch thermische Anregungen verschmiert. Da viele Festkörper-Quanteneffekte extrem tiefe Temperaturen erfordern, ist es schwierig, sie zu untersuchen, und noch schwieriger, sie praktisch zu nutzen.

In der Regel tauchen bei Spins in Festkörpern zwei Probleme auf. Das erste ist die so genannte Spinbahnkopplung zwischen dem Spin des Elektrons und seiner Umlaufbahn. Das zweite sind magnetische Wechselwirkungen mit anderen Spins, etwa mit dem Spin der Atomkerne, aus denen das Gitter besteht. In Diamant sind beide Effekte sehr schwach. Zum Beispiel haben die Kerne des Isotops Kohlenstoff-12, das 99 Prozent des natürlichen Kohlenstoffs ausmacht, den Spin null – und somit keinen Einfluss auf den Spin eines NV-Zentrums. Da dessen Quantenzustand so immun gegen äußere Störungen ist, lässt sich damit sogar bei Zimmertemperatur Quanteninformation kodieren.

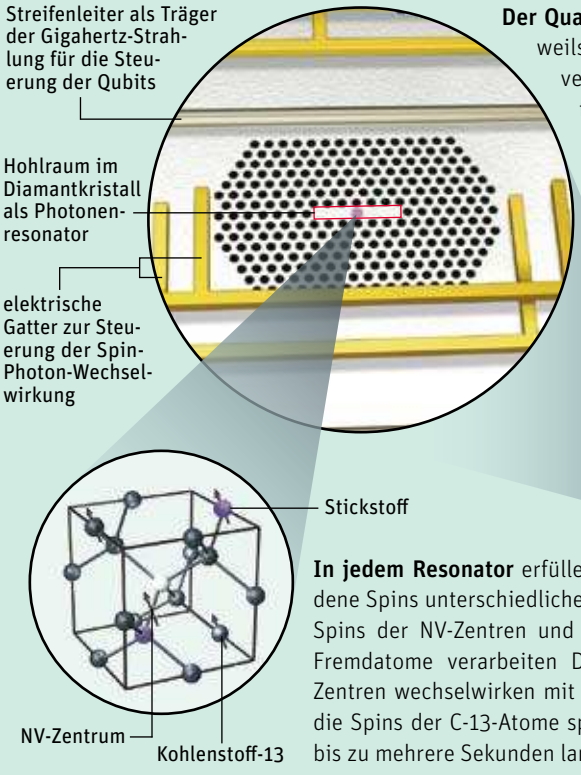
Natürlich ist »immun« relativ. Die in einem NV-Zentrum gespeicherte Quanteninformation geht in hochreinem Diamant bei Zimmertemperatur nach rund einer Millisekunde (tausendstel Sekunde) verloren. Dieser Datenverlust entspricht einem Bit-

Diamant hat viele Fassetten

- Der **Name** leitet sich vom altgriechischen *adamas* = unbezwingbar her.
- Diamant ist **die härteste natürlich vorkommende Substanz**. Noch etwas härter sind dicht gepackte Diamant-Nanostäbchen.
- Diamant **leitet Wärme** besser als jeder andere Festkörper.
- Diamant hat einen **hohen Brechungsindex** von 2,4 (Glas hat 1,5).
- Reiner Diamant ist ein **Nichtleiter**, kann aber durch Dotierung mit Fremdatomen zum Halbleiter werden.
- Wegen der großen Bandlücke zwischen gebundenen Elektronen und Leitungselektronen ist halbleitender Diamant **optisch transparent** bis tief in den Ultraviolettbereich. Darum eignet er sich für UV-Detektoren und Licht emittierende Dioden sowie für die Hochleistungselektronik.
- Die **große Bandlücke** ist eine Voraussetzung für spintronische Anwendungen, weil Fremdatome sich anregen lassen, ohne dabei ionisiert zu werden.
- Ein besonderer Vorteil: Spinzustände von Fremdatomen in Diamant können **sogar bei Zimmertemperatur** sehr lange (rund eine Millisekunde) ihren Quantencharakter behalten.

Zukunftsmusik: Der diamantene Quanten-Mikroprozessor

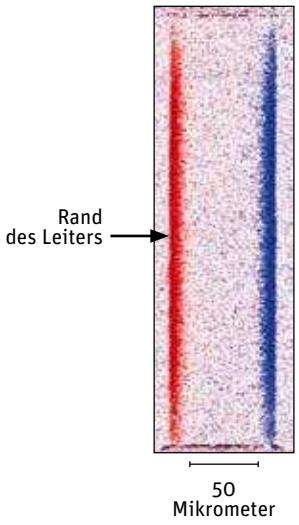
Künftig wird man für spezielle Aufgaben vielleicht Quantencomputer benutzen, die auf Diamant-Spintronik beruhen.



Der Quantenprozessor enthält Millionen von optischen Resonatoren, die jeweils aus in den Diamant geätzten Lochmustern bestehen. Die Resonatoren verstärken die Wechselwirkung zwischen Spins im Zentrum des Resonator-Hohlraums (roter Punkt) und Photonen, die Quanteninformation zu anderen Stellen im Chip übertragen. An Elektroden angelegte Spannungen steuern diese Wechselwirkung. Gigahertz-Radiowellen, die durch Streifenleiter gesendet werden, manipulieren einzelne Spinzustände, die Qubits repräsentieren.

In jedem Resonator erfüllen verschiedene Spins unterschiedliche Aufgaben: Die Spins der NV-Zentren und der Stickstoff-Fremdatome verarbeiten Daten, die NV-Zentren wechselwirken mit Photonen, und die Spins der C-13-Atome speichern Daten bis zu mehrere Sekunden lang.

DIESE SEITE: JEAN-FRANÇOIS PODEVIN



Experimenteller Nachweis des Spin-Hall-Effekts

Im Jahr 2005 wurden Elektronen mit entgegengesetzter Spinpolarisation (rot, blau) nachgewiesen, die sich an den Rändern eines Leiters ansammelten, durch den in Längsrichtung Strom floss.

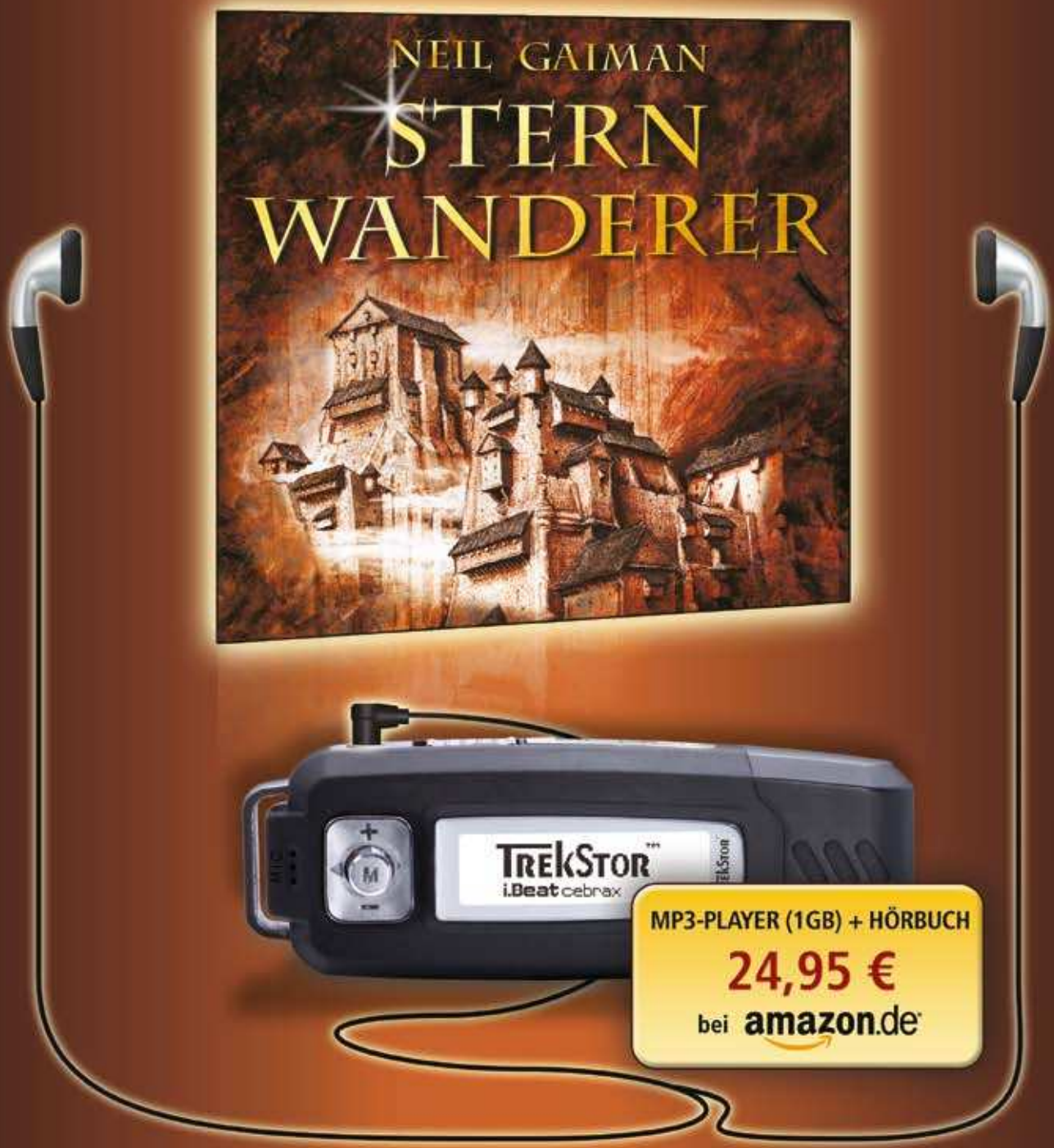
wechsel in einem gewöhnlichen Computer. Wie dort können auch Qubit-Fehler korrigiert werden, sofern die Fehlerrate klein genug bleibt. Eine Faustregel für die Quantenfehlerkorrektur besagt, dass höchstens eine von zehntausend Operationen versagen darf; sonst wird das Verfahren zur Sisyphusarbeit, da die Korrektur mit ihren zusätzlichen Daten und Operationen ihrerseits zu viele neue Fehler verursacht.

Wie gut besteht das NV-Zentrum in Diamant die Eins-zu-zehntausend-Prüfung? Strahlung im Radiofrequenzbereich, die durch Wellenleiter auf dem Chip zum NV-Zentrum geleitet wird, vermag dessen Spin binnen zehn Nanosekunden (milliardstel Sekunden) gezielt zu verändern. Rund hunderttausend solche Operationen passen in die einige Millisekunden währende Lebensdauer des Spinquantenzustands, und somit liegt die Fehlerrate sehr grob bei einem Fehler pro hunderttausend Operationen. Das bleibt weit unter dem Grenzwert und ist bislang besser als bei jedem anderen System von Festkörper-Qubits.

Die Quantenkryptografie erfordert nur eine Folge einzelner Qubits, aber im Quantencomputer müssen die Qubits wechselwirken und neue Qubits erzeugen – analog zu den logischen Gattern herkömmlicher Rechner, die Paare von Input-Bits verarbeiten und einen Output liefern. Beispielsweise erzeugt ein UND-Gatter als Output Eins, wenn beide Inputs Eins betragen, ansonsten Null. Quantenlogische Gatter müssen die gleichen Operationen ausführen, aber mit Quantensuperpositionen von Bits als Input und Output. Der nächste Schritt zur Quanteninformationsverarbeitung mit Defekt-Spins ist die gesteuerte Kopplung zwischen zwei Spins, um Quantenlogik zu praktizieren.

Unsere Gruppe und Wrachtrups Team haben zu diesem Zweck die Wechselwirkung zwischen zwei im Diamantgitter eng benachbarten Spins untersucht. Genauer gesagt, wir haben gemessen, wie der Spin eines NV-Zentrums mit einem anderen Spin auf einem benachbarten Stickstoff-Fremdatom – ohne Fehlstelle – reagiert. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um magnetische Dipolkopplung, praktisch dieselbe Kraft, die auch zwei makroskopische Stabmagneten veranlasst, sich so auszurichten, dass Nord- und Südpole beisammenliegen.

MP3-Player + Hörbuch-Download



TREKSTOR
Enjoy now.

Hören Sie jetzt zum Kinostart „den besten Fantasy-Roman des Jahres", den Gewinner des British Fantasy Award 2006 – jetzt auf Ihrem TrekStor MP3-Player vorinstalliert.

audible.de
Hörbücher und Audiomagazine zum Download

Die Wechselwirkung funktioniert folgendermaßen. Der Null- und der Eins-Zustand eines NV-Zentrums haben etwas unterschiedliche Energien. Die Energiedifferenz oder Aufspaltung zwischen der Null und der Eins ist viel kleiner als die Energie eines optischen Photons; darum schalten Gigahertz-Radiowellen (Milliarden Hertz) die Spins zwischen Null und Eins – und den Superpositionen der beiden Werte – hin und her. Liegt das NV-Zentrum nun knapp neben einem weiteren Stickstoffatom, so hängt die Aufspaltung seiner Null- und Einszustände vom Spinzustand dieses Stickstoffatoms ab. Dieser Zusammenhang ermöglicht ein kontrolliertes NICHT-Gatter *(CNOT-gate)*, in dem ein Qubit dann und nur dann den Wert wechselt, wenn das andere Qubit Eins ist. Das Gatter arbeitet mit Radiowellen, deren Frequenz das NV-Zentrum umschaltet, sofern der Stickstoff-Spin einer Eins entspricht. Wenn der Stickstoff-Spin Null bedeutet, hat die Energieaufspaltung des NV-Zentrums einen anderen Wert, und die Radiowellen beeinflussen es nicht.

Präzis platzierte Fremdatome

Das CNOT-Gatter ist etwas ganz Besonderes: Wir können jede beliebige Quantenoperation mit beliebig vielen Qubits darstellen, indem wir CNOT-Gatter kombinieren, die auf Qubit-Paare und auf Rotationen einzelner Qubits einwirken. Das lässt sich auch durch Einwirken von Radiowellen auf Spins erreichen; einzelne Spins werden angesteuert, indem die Strahlung durch spezielle Leiterbahnen, so genannte Streifenleiter, zu ihnen geführt wird. Die Konstruktion eines CNOT-Gatters und das Realisieren von Qubit-Rotationen sind darum wichtige Forschungsziele.

Über größere Distanzen hinweg sind Wechselwirkungen zwischen NV-Spins in Diamant vielleicht mit Photonen als Vermittlern möglich. Optische Bauteile auf Chips – beispielsweise Wellenleiter aus demselben Diamantsubstrat – könnten die Photonen führen. Die Wechselwirkung zwischen den Spins und den Photonen ließe sich steigern, wenn die NV-Zentren in optische Resonatoren integriert würden – in Hohlräume, worin das Licht stehende Wellen bildet. In Santa Barbara haben wir kürzlich zusammen mit Evelyn Hu und ihren Studenten im Prinzip photonische Kristallhohlräume realisiert. Jeder optische Resonator besteht aus einem Diamantabschnitt, in den ein Wabennetz von Löchern geätzt wurde. Die Löcher beschränken Licht auf das Zentrum der Struktur und verstärken es (siehe »Halbleiter für Lichtstrahlen« von Eli Yablonovitch, Spektrum der Wissenschaft 4/2002, S. 66). Doch bislang steht diese Arbeit ganz am Anfang: Da die NV-Zentren nicht präzise in den Hohlräumen positioniert, sondern zufällig im Diamanten verteilt sind, spielen sie in unseren Versuchen nur eine Nebenrolle.

Viele Experimente mit NV-Zentren nutzen bisher synthetische Diamanten, wie wir sie bei unseren optischen Resonatoren verwenden: Die NV-Zentren sind darin von selbst an zufälligen Orten entstanden, während der Diamant wuchs. Nun aber gelingt es Forschern an der Australischen Nationaluniversität in Canberra, an der Universität Bochum und am Lawrence-Berkeley-Nationallaboratorium in Kalifornien immer besser, einzelne Fremdatome an bestimmte Orte zu setzen. Sie verwenden fortgeschrittene Verfahren der Ionenimplantation, um einzelne Stickstoffionen auf weniger als einen Mikrometer genau einzupflanzen. Dann erhitzen sie den Diamanten auf 850 Grad, wodurch die Fehlstellen im Kristall umherwandern. Wenn eine Fehlstelle einem Stickstoffatom begegnet, bleibt sie bei ihm und bildet ein NV-Zentrum.

NV-Zentren scheinen sich zwar gut für die Verarbeitung von Quanteninformation zu eignen – aber was ist mit deren Speicherung über die wenige Millisekunden lange Zerfallszeit der elektronischen Spinzustände hinaus? Die Gruppe um Mikhail Lukin an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) erforscht einen Ansatz, der den Spin der Kohlenstoffkerne nutzt. Da der Kern des häufigsten Kohlenstoffisotops C-12 den Gesamtspin Null hat, verwendete die Gruppe C-13, dessen Kern den Spin des einen zusätzlichen Neutrons besitzt. Die Forscher übertrugen die im Spin eines NV-Zentrums kodierte Information auf einen einzelnen Kernspin von C-13 und gewannen sie 20 Millisekunden später wieder zurück. Da der Kernspin kein Anzeichen von Verfall erkennen ließ, könnte der Quantenzustand auch mehrere Sekunden lang andauern. Demnach scheinen Kernspins einen günstigen Zugang zur Qubit-Speicherung zu bieten. Die Harvard-Forscher haben auch einen Signal-Zwischenverstärker *(Repeater)* nach diesem Prinzip vorgeschlagen, um Qubits über größere Entfernungen zu übertragen.

Die Erforschung der Quanteninformation steckt noch in den Kinderschuhen, und viele ganz unterschiedliche Computerarchitekturen wetteifern miteinander. Seit die Spinforschung auf Diamantbasis in den letzten Jahren rasche Erfolge erzielt hat und nun auch Firmen wie Hewlett-Packard mitmischen wollen, mutet ein Quantencomputer bei Zimmertemperatur nicht mehr wie pure Sciencefiction an. Das diamantene Zeitalter der Quantenelektronik hat vielleicht schon begonnen. ◁

David D. Awschalom (Foto) ist Direktor des Zentrums für Spintronik und Quantencomputer an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara sowie dort Professor für Physik und Computertechnik. Seine Forschungsgruppe untersucht die Dynamik von Elektronenspins in verschiedenen Halbleitersystemen. **Ryan Epstein** promovierte bei Awschalom über Stickstoff-Fehlstellen-Zentren in Diamant. Derzeit arbeitet er am National Institute of Standards and Technology in Boulder (Colorado) mit Ionenfallen. **Ronald Hanson** forschte in Awschaloms Team und wurde kürzlich Dozent für Physik am Kavli Nanoscience Institute in Delft (Niederlande).

Spins in few-electron quantum dots. Von R. Hanson et al. in: Reviews of Modern Physics (im Druck)

Challenges for semiconductor spintronics. Von D. A. Awschalom und M. E. Flatté in: Nature Physics, Bd. 3, S. 153, 2007

Two groups observe the spin Hall effect in semiconductors. Von Charles Day in: Physics Today, Bd. 58, S. 17, 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/910596.

NUSSKNACKER

Harte Schale, brüchiger Kern

Rohe Kräfte vorsichtig walten zu lassen ist eine Kunst, vor allem beim Nüsseknacken im industriellen Maßstab.

Von Mark Fischetti

Husaren in prächtigen Uniformen stehen nun wieder bereit, mit ihrem hölzernen Gebiss Nüsse zu knacken. Denn: »Apfel, Nuss- und Mandelkern essen brave Kinder gern.« Manche Schale wird ohne Hilfe aus dem Erzgebirge, durch Schrauben oder mit stählernen Zangen gesprengt, doch bei solcher Heimwerkerarbeit geht nicht selten der Kern mit zu Bruch. Soll der ein Weihnachtsplätzchen zieren, erleichtern maschinell geschälte Nüsse die Arbeit in der Backstube. Industrielle Anlagen verarbeiten dreißig bis sechzig Tonnen Nüsse pro Tag, in mehr als 99,9 Prozent der Fälle bleibt der leckere Inhalt unversehrt.

Rüttelmaschinen haben die Früchte oft Monate zuvor von den Bäumen oder Sträuchern auf den gereinigten Boden geschüttelt, dort werden sie in Reihen zusammengeblasen und dann gesammelt. Mit Schmutz, Gras, Blättern, Ästen und Steinen kommen sie auf einen Rüttler, also ein maschinell hin- und herbewegtes Sieb, durch das feinere Bestandteile hindurchfallen. Weitere Siebe sortieren die Nüsse nach Größe.

Nach dieser Einteilung werden auch die Anlagen beschickt, in denen die Schalen geknackt werden. Zum Beispiel gibt es Maschinen für Mandeln der Stärken 1,25, 1,4 und 1,6 Zentimeter. Walnüsse kategorisiert man in vier, Pekannüsse meist in fünf, Erdnüsse in sechs Größenklassen. Je genauer die tatsächlichen Abmessungen der Einteilung entsprechen, desto unwahrscheinlicher werden Schäden an den Kernen.

Einige Nüsse stellen eine besondere Herausforderung dar. Paranüsse sind eigentlich Samen, die in Gruppen von acht bis 24 Exemplaren in einer Schote wachsen. Und die muss, einer Kokosnuss nicht unähnlich, ebenfalls geknackt werden. Zudem gibt es für hart- und weichschalige Nüsse unterschiedliche Herangehensweisen (siehe Grafik). Die grundlegenden Schritte – Verunreinigungen beseiigen, Schalen aufbrechen und entfernen – bleiben aber immer die gleichen. Das Wichtigste ist, immer wieder das Zwischenprodukt zu reinigen. Der Aufwand lohnt sich offenbar. In Sachen Walnuss dominiert Kalifornien den Markt, die Türkei ist Weltmeister im Export von Haselnüssen.

Mark Fischetti ist Redakteur bei Scientific American.

Nüsse mit weicher Schale, zum Beispiel Mandeln, werden von Beimengungen der Ernte getrennt und durch Sieben nach Größen sortiert. Sie fallen in einen Spalt zwischen zwei Rollen, der etwas schmaler ist als die Nussdicke. Eine der Rollen dreht sich geringfügig schneller als die andere. So entsteht eine Scherkraft, die die Schale aufbricht und vom Kern reißt. Ganz anders funktioniert es bei Erdnüssen: Diese werden durch Schlitze gepresst, welche die Schalen aufschneiden.

Nüsse mit einer harten Schale, etwa Pekan- oder Haselnüsse, werden für drei bis zwölf Minuten in knapp neunzig Grad Celsius heißem Wasser eingeweicht. Eine Kette führt sie dann an einem Kolben vorbei, der mit etwa 0,2 Bar beziehungsweise zwanzig Kilopascal gegen die Schale schlägt und sie so knackt.

Wussten Sie schon?

Nüsse werden im Herbst geerntet, aber das ganze Jahr über verarbeitet. Zwischen null und fünfzehn Grad Celsius gelagert halten ungeschälte Mandeln sechs bis acht Monate lang. Pekannüsse kann man sogar zwei bis drei Jahre lang gefroren aufbewahren, denn sie bestehen zu achtzig Prozent aus Fetten, die beim Einfrieren stabil bleiben.

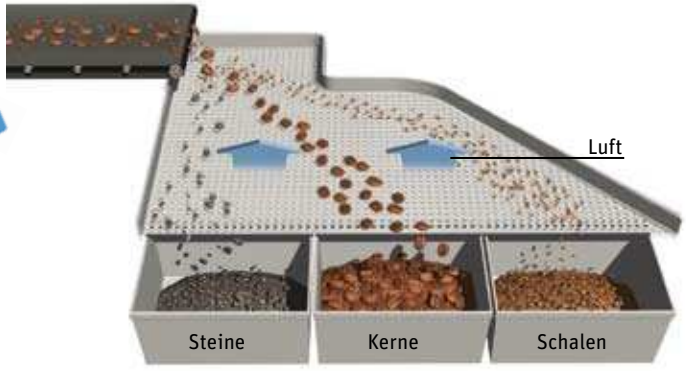
Täglich eine Hand voll Nüsse soll das Risiko von Herzerkrankungen senken, sagt Silke Restemeyer von der Deutschen Gesellschaft für Ernährung in Bonn. Denn Nüsse enthalten reichlich ungesättigte Fettsäuren, zum Beispiel hundert Gramm Walnüsse etwa sechs Gramm Omega-3-Fettsäuren. Zusätzlich liefern sie Eiweiße und Ballaststoffe, Eisen, Folsäure, Kalium, Kupfer, Magnesium, Thiamin und Vitamin B2. Doch sollte man sie auch in der Weihnachtszeit nur in Maßen, nicht in Massen verzehren, denn immerhin liefern hundert Gramm Nüsse etwa 600 Kilokalorien. Das ist allerdings nur wenig mehr als die gleiche Menge Vollmilchschokolade (540 Kilokalorien).

Cashewnüsse stammen meist aus Indien, Malaysia, Indonesien und dem östlichen Afrika. Die Frucht wird dort in der Regel von Hand geerntet und geöffnet. Das Öl der Schale ist giftig und reizt die Haut, weshalb die Nuss vor dem Öffnen getrocknet und geröstet wird. Außerdem schützen die Arbeiter ihre Hände mit Holzasche, Leinsamen- oder Rizinusöl.

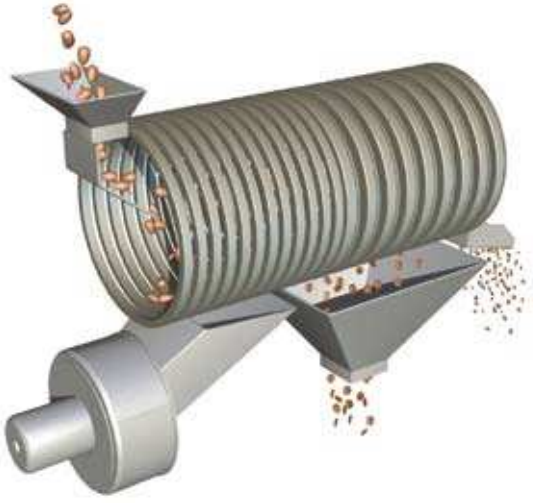
Früher verbrannte man Haselnussschalen, inzwischen verwendet man sie auch zur Bodenbedeckung. Weil sie wenig Feuchtigkeit aufnehmen, lassen sie Regenwasser versickern, schützen den Boden aber vor dem Austrocknen. Zudem zersetzen sie sich nur langsam und behindern das Auskeimen von Unkrautsamen.

Der Name »Walnuss« stammt von der »welschen Nuss« ab – der bei den Römern sehr geschätzte Baum wurde in Gallien kultiviert. 1770 gelangte er mit spanischen Missionaren in die Neue Welt, 1867 begann der kommerzielle Anbau in Kalifornien.

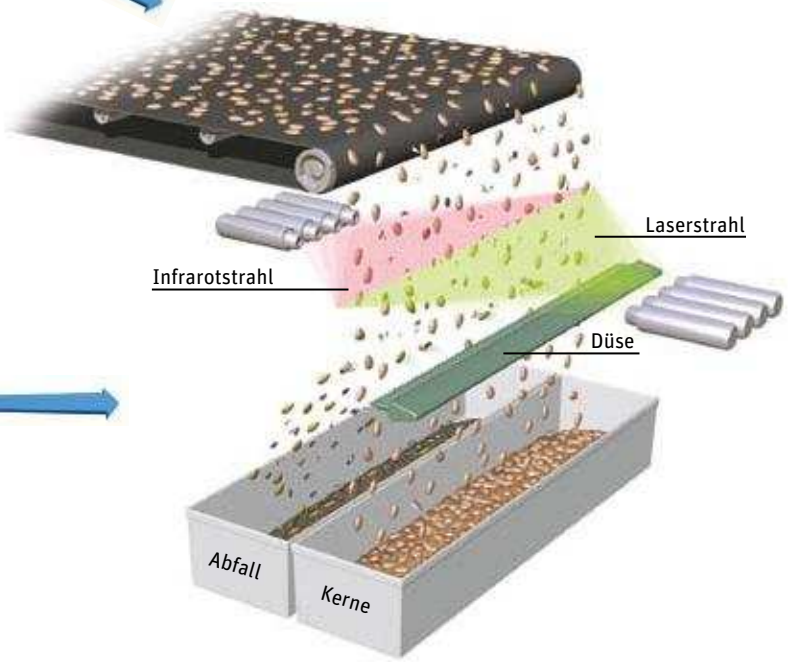
ILLUSTRATIONEN: GEORGE RETSECK;
FOTO MANDELN: LEONID NYSHKO / FOTOLIA; FOTO PEKANNÜSSE: EX QUISINE / FOTOLIA



Aufgebrochene Nüsse fallen auf einen Siebtisch. Vibrationen und ein Luftstrom sorgen für eine Auftrennung: Schalenreste wandern abwärts, Kerne in die Mitte des Tischs, Verunreinigungen wie kleine Steine fallen unbeeinflusst vom Luftstrom rasch nach unten.



Unterdruck zieht die Nüsse durch eine rotierende Trommel. Darin schlagen Ringe die Kerne aus den Schalen.



Kerne und restliche Verunreinigungen laufen auf einem Band an einem Scanner vorbei, der sie mit Laserstrahlen oder infrarotem Licht auf Form und Farbe abtastet. Auf diese Weise lassen sich gebrochene oder faule Kerne ermitteln und durch einen kurzen Luftstrom vom Band fegen. Abschließend prüfen Arbeiter stichprobenartig die Ware, bevor sie endgültig verpackt wird.

ARCHÄOLOGIE

Geheimnisse der Kultur von Elam

Welche Beziehung die Angehörigen dieser uralten Kultur zwischen Frauen und Schlangen sahen, bleibt weiterhin ungeklärt.

Wo liegt das Land Elam, und wer waren seine Bewohner? In der Bibel (Genesis Kapitel 10, Vers 22, und Kapitel 14) finden sich nur zwei wenig ergiebige Erwähnungen des Namens. Aber die Sumerer und Akkader pflegten engen Kontakt zu ihren östlichen Nachbarn. So berichten Tontafeln von Elam als dem »oberen Land«, jenen ausgedehnten Berglandschaften, die sich im Osten bis zur Wüste Lut erstrecken und im Süden zur fruchtbaren Ebene Chusistan erweitern. Auf Grund gemeinsamer Kulturmerkmale, besonders der unverwechselbaren Keramik und vermutlich auch der Sprache, ist Elam in den Grenzen des heutigen Iran zu lokalisieren.

Heidemarie Koch, Professorin für Altiranistik an der Universität Marburg, lädt in ihrem Buch zu einer Zeitreise durch dieses weit gehend unbekannte Land ein. In fünfzehn Kapiteln durchmisst sie die letzten fünf vorschristlichen Jahrtausende, mit Schwerpunkt auf charakteristischen Fundorten und ihrem Fundgut. Hinzu kommen neue Forschungsergebnisse zu frühen Stadtgründungen, Bauwerken, Herrschafts- und Sozialstrukturen, Götter- und Grabkult, Religion, Kunst und Alltagsleben, Stellung der Frau sowie Klima, Landwirtschaft, Handel und Handwerk.

Vereinzelte Siedlungsspuren sind seit dem 7. Jahrtausend v. Chr. im fruchtbaren Land der heutigen iranischen Provinz Chusistan nachweisbar. Dort wurde um 4200 v. Chr. erstmals ein Verwaltungssitz namens Susa gegründet, der zur Hauptstadt des Reiches Elam heranwuchs. Seine Bewohner bauten lange vor den Sumerern den ersten Stufentempel (Zikkurat) im Vorderen Orient. Dieses Gemeinschaftswerk erforderte umfangreiche Planung und konnte, so die Autorin, nur unter der Leitung einer starken Persönlichkeit erstehen.

Noch heute beeindrucken die Massen an luftgetrockneten Lehmziegeln, die von der monumentalen Anlage übrig geblieben sind, ebenso wie die hier geborgenen Kleinfunde. Feinste Keramik trägt expressive Bemalung mit Tieren, möglichen Tempel- und Götterbildern und Symbolen, wie dem schwer zu deutenden achtförmigen Kiden-Zeichen. Ferner fanden sich eine Fülle von Symbolsteinen, dazu deren versiegelte Behältnisse (Tonbullen), seltsame Terrakottafiguren, steinerne Milchgefäße, miniaturhafte Frauen- und Tierplastiken. Letztere zeugen besonders von der ungewöhnlichen Fantasie der Elamer, wie der mit einem Rock bekleidete Stier, der – kniend wie ein Mensch – eine große Vase zwischen den Vorderhufen hält (Bild rechts), oder ein Siegelabdruck mit Tieren, die wie Menschen in einer Werkstatt arbeiten.

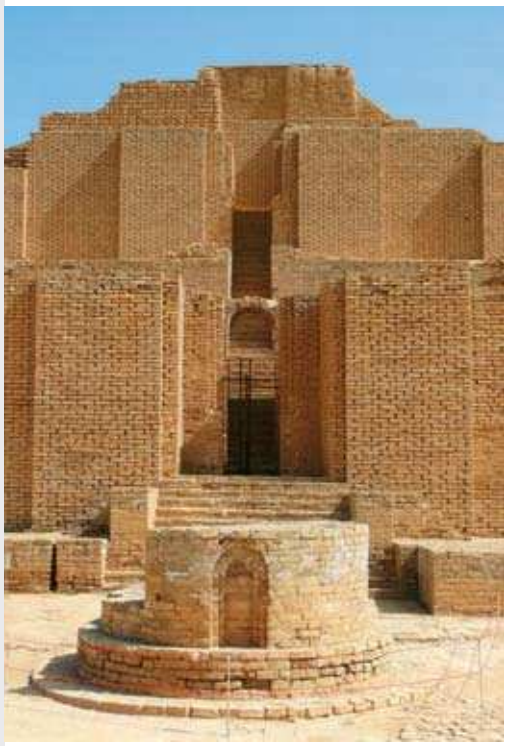
Im 4. Jahrtausend v. Chr. entstanden neben Susa blühende Stadt- und Handelszentren im Osten Elams. Chlorit, ein dunkelgrüner Stein, der in Tepe Yahya und Djiroft abgebaut wurde und diesen Städten großen Reichtum brachte, eignete sich vorzüglich zur Gefäßherstellung, wie mehr als tausend Artefakte belegen. Den Betrachter überraschen aber nicht nur originell verzierte Grabgefäße, sondern vor allem die als »Schlangenhandtaschen« wahrgenommenen Objekte (Titelbild des Buchs). Ihr praktischer Nutzen ist unklar; man vermutet, dass sie als tragbare Gewichte dienten.

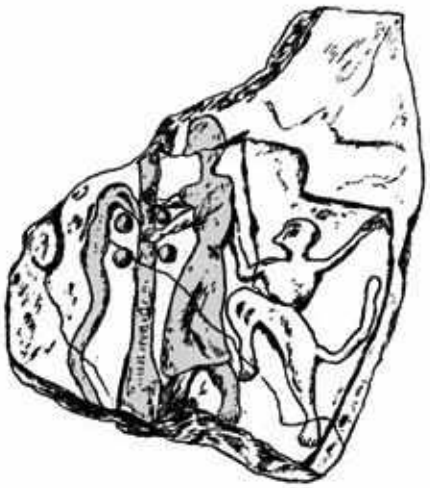
Blütezeit unter König Untasch-Napirischa

Spannende Kapitel führen den Leser an die Erfindung der frühen Schrift und ihre Entzifferung heran. Die proto-elamische Strichschrift ist älter als die sumerische Keilschrift und eng mit dem Aufkommen früher Verwaltungssysteme verknüpft. Bis zu drei Zentimeter große, eigenartig geformte Tonplättchen tragen geometrische oder figürliche Muster, teils eingetieft, teils aufgemalt. In einem komplizierten Prozess wurden aus diesen Symbolen Bild- und später Schriftzeichen, was die Autorin als die höchste geistige Leistung der Elamer herausstellt.

Elams Blütezeit fällt in das 14. bis 11. Jahrhundert v. Chr. Verschiedene Dokumente berichten von erfolgreichen Beutezügen, neuen Handelswegen, wechselnden Herrschaftsdynastien sowie von reichen Heiraten und komplizierten Familienbanden, die Inzucht nicht ausschließen. In diesem Zusammenhang wäre eine Herrscherliste der zeitgleich regierenden Fürsten westlich des Tigris eine hilfreiche Ergänzung gewesen.

Unter König Untasch-Napirischa erreichte Elam seine größte Ausdehnung. Sichtbarer Ausdruck des Wohlstands ist der gewaltige Zikkuratbau von Dur-Untasch nahe





Vor dem Aufgang zum Hochtempel der monumentalen Zikkurat in Dur-Untasch (links) ist ein stufenförmiger Backsteinsockel als Altar errichtet. Der Siegelabdruck aus Susa, um 3300 v. Chr. (rechts), scheint die Verführung der Eva darzustellen.

Susa (Bild links). Noch heute ist er der besterhaltene Stufentempel im Vorderen Orient. Die 100 Hektar große Anlage mit dreifachem Mauerring, Neben- und Tieftempel sowie Ziegelsockel für Schlachtopfer beeindruckt nachhaltig. Im akkurat gemauerten Sockel aus gebrannten Ziegeln von 105 Meter Länge wurden 659 Inschriftenziegel von Untasch-Napirischa gefunden; sie tragen Weihungen an Inschuschinak, den höchsten Gott Susas. In anderen Ziegeln fanden sich Gold-, Silber- und farbige Emailreste zur prachtvollen Reflexion der Sonnenstrahlen.

Von diesem baufreudigen König ist kein Bildnis erhalten, aber die fast lebensgroße Bronzestatue seiner Frau Napir-asu zählt zu den Kostbarkeiten des Louvre. Dieses Werk bezeugt sowohl die exzellente manuelle Fertigkeit der elamischen Handwerker als auch die Eigenständigkeit der Königin. Es war nachweislich sie selbst, die eine Aufstellung ihrer Statue veranlasste, damit deren elegantes Gewand und würdige Haltung ihren hohen sozialen Status signalisiere.

Überhaupt genoss die Frau in der elamischen Gesellschaft eine für diese Zeit ungewöhnliche Wertschätzung. Schon sehr früh wurden weibliche Gottheiten, besonders die Göttin Pinengir, verehrt. In dynastischen Kreisen hatten die Mütter den jeweils legitimen Erben und berechtigten Thronfolger zu bestimmen. Auch eine einfache Ehefrau hatte eine rechtlich gesicherte Position und die Erlaubnis für eigenen Besitz.

»Die Elamer liebten Schlangen und Frauen«, hatte Heidemarie Kochs Lehrer, der bekannte Altorientalist Walther Hinz, schon 1964 in seinem Buch »Das Reich Elam« konstatiert. Gemessen and dem Buchtitel »Frauen und Schlangen« ist das gleichnamige Buchkapitel mit nur fünf Seiten überraschend kurz.

Schlangenbilder in differenzierten Ausprägungen als Symbol der Fruchtbarkeit und des göttlichen Willens reichen weit in die Frühzeit Elams zurück, sprechen für den hohen Stellenwert dieses unheimlichen Tiers. Aber bisher schienen die Themen Frauen und Schlangen in der elamischen Vorstellungswelt in keinem direkten inhaltlichen Zusammenhang zu stehen. Umso mehr überrascht ein abschließender Blick auf zwei Funde aus Susa: Ein kleines Terrakottafragment vom Ende des 3. Jahrtausends v. Chr. zeigt eine Schlange, die sich um Kopf und Brüste einer Frau windet. Ein Siegelabdruck um 3300 v. Chr. zeigt einen Baum mit runden Früchten, nach denen eine rechts stehende Frau greift (Bild links, rechtes Teilbild). In dieser Geste wird sie von einem hinter ihr stehenden katzenartigen Mischwesen vorwärts gedrängt. Links vom Baumstamm erhebt sich senkrecht eine Schlange. Die merkwürdige Szene erweckt sofort Assoziationen an unsere christlichen Vorstellungen vom Sündenfall, verträgt sich aber nicht mit den elamischen von Frauen und Schlangen. So gibt die Deutung des Bildes – wie vieler anderer – den Forschern immer wieder Rätsel auf.

Im 1. Jahrtausend v. Chr. geht die uralte elamische Kultur unter dem Ansturm der Perser und Meder aus dem Norden im Persischen Weltreich auf, aber nicht völlig unter. Die Elamer vermitteln den siegreichen, aber schriftunkundigen Reiternomaden auf deren Wunsch hin ihr Wissen um Verwaltung und Schrift.

Heidemarie Koch entwirft ein großartiges Panorama Elams, der vergangenen, immer noch weit gehend unbekannten Hochkultur. In klarem, verständlichem Stil spricht sie alle Aspekte kulturellen und politischen Lebens an, basierend auf neuesten archäologischen, epigrafischen und linguistischen Forschungsergebnissen. Exzellente Fotos dokumentieren Wesentliches und Seltenes. Diese Neuerscheinung wird Altertumsfreunde fesseln und Fachleute zu interdisziplinären Diskussionen anregen. Sie stellt nämlich die Elamer gleichberechtigt neben die Sumerer und Akkader, deren Regionen bereits seit dem 19. Jahrhundert intensiv erforscht wurden – auf der Suche nach dem biblischen Paradies!

Eva Grabow

Die Rezensentin ist promovierte Archäologin, freie Mitarbeiterin am Archäologischen Museum der Universität Münster und Volkshochschuldozentin mit vielseitiger Vortragstätigkeit.

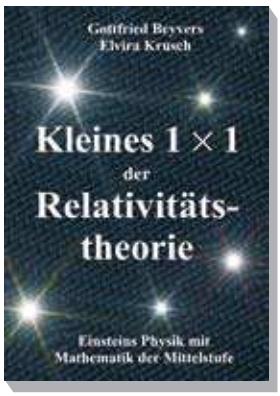
Silberfigur eines Stiers, der in menschlicher Weise kniet und einen Rock trägt

Heidemarie Koch

Frauen und Schlangen

Die geheimnisvolle Kultur der Elamer in Alt-Iran

Philipp von Zabern, Mainz 2007.
188 Seiten, € 39,90



Einstein endlich verstehen!

- klarer Text
- exakte Abbildungen
- hürdenfreie Rechenschritte

Gottfried Beyvers, Elvira Krusch
Kleines 1 × 1 der Relativitätstheorie
Einsteins Physik mit Mathematik der Mittelstufe

400 Seiten, gebunden, € 33,80
ISBN 978-3-8334-6291-7
www.1x1relativitaet.de

PHILOSOPHIE

Es war kein Gott

Für die Erklärung der Eigenschaften unseres Universums könnte die Vielweltenhypothese in absehbarer Zeit zum Standardmodell der Kosmologie avancieren.

Wie können jene Eigenschaften des Universums erklärt werden, welche die Fülle des Lebens möglich machen? Dieser Frage geht der vor einem Jahr verstorbene Physiker Henning Genz in seinem Buch nach. Mehr oder weniger eng kreisen daher die Betrachtungen um das ebenso ominöse wie hartnäckig verteidigte Anthropische Prinzip (AP): Ist das Universum so, wie es ist, insbesondere so, dass Menschen darin entstehen können, weil es – von einem Gott oder, vorsichtiger ausgedrückt, einem »Planer« – mit diesem Ziel erschaffen wurde? Weil es wegen bisher unbekannter Naturgesetze nicht anders sein konnte? Weil es eben so ist, ohne dass es eine weiter gehende Erklärung gäbe? Oder weil unser Universum eines von vielen ist? Dann ist es nicht verwunderlich, dass wir in einem menschenfreundlichen Universum leben, denn in allen anderen gibt es uns nicht.

Gleich zu Anfang weist Genz die teleologischen und subjektivistischen Varianten des AP zurück. Dann aber zeigt er an eindrucksvollen Beispielen, dass auch ein reduktionistischer philosophierender Physiker wie er selbst die Feinabstimmung der Naturkonstanten als Faktum nicht bestreiten kann: Eine kleine Abweichung der Naturkonstanten von ihren beobachteten Werten würde unserer Existenz die Voraussetzungen entziehen. Besonderen Wert legt der Autor dabei auf die in vielen Abhandlungen übersehene Tatsache, dass eine Reihe von Konstanten in Bezug auf ihre Lebensfreundlichkeit übererfüllt sind: Die Feinabstimmung ist genauer, als sie zur Lebensentstehung sein müsste. Der hypothetische Planer hätte also – wenig plausibel – des Guten etwas zu viel getan.

Wenn man irgendwo eine Uhr vorfinden würde, dann wäre aus der Feinabstimmung ihrer Einzelteile auf die Existenz eines Uhrmachers zu schließen. Wir finden im Universum eine Feinabstimmung vor, also wäre nach dem Theologen William Paley auf die Existenz eines »Planers« zu schließen. Aber naturteleologische Planungserklärungen wie diese, die Genz gründlich durchgeht, gründen immer auf Analogieschlüssen, und diese sind nun einmal formallogisch inkorrekt. Sie können als Denkhilfe dienen, sind jedoch in dem neuen Bereich, in den sie übertragen werden, unabhängig zu prüfen.

Nach etlichen historischen und nicht immer einsichtigen Umwegen gelangt der Autor zum Kernproblem der Notwendigkeit oder Zufälligkeit der Werte der Naturkonstanten und damit verbunden zur Frage der Existenz von Mehrfach- oder Parallelwelten. Erstaunlicherweise spielt Genz, wenn die Erklärung von Konstanten wie den Massen der Quarks oder der kosmologischen Konstante λ auf Schwierigkeiten stößt, immer wieder mit der Planungshypothese, als ob diese im Prinzip eine rationale, verstehbare, logisch kohärente Alternative wäre. Dabei ist der Begriff der »Planung« – der Autor spricht immer von »Design« – außerhalb des Kontextes menschlicher Aktivität ein semantisch völlig konfuser Begriff. Niemandem ist es je geglückt zu klären, was es heißen soll, dass ein unmaterielles, raumzeitloses Wesen etwas »plant«. Welche identifizierbaren Prozesse in diesem zeitlosen Agens könnten der Konstruktion eines Musters entsprechen, das anschließend in einem ebenso kausal rätselhaften Schöpfungsprozess in die Wirklichkeit umgesetzt wird?

Multiversum als Hypothese

Die Hypothese des Multiversums ist zweifellos momentan die spannendste Frage im Grenzbereich von Kosmologie und Philosophie. Die Stringtheorien erfordern eine ungeheure Anzahl (eine »Landschaft«) von Vakua mit positiver Energiedichte, in der Größenordnung irgendwo zwischen 10^{100} und 10^{500}; Genz übernimmt den Wert 10^{130} von Lee Smolin. Solange diese Vielfalt nicht theoretisch eingeschränkt werden kann, ist die Lebensfreundlichkeit unserer Welt nicht durch die Stringtheorien erklärbar: Es hilft nichts, wenn man weiß, dass das Universum eine von unermesslich vielen Möglichkeiten realisiert, die nun offensichtlich gerade lebensfreundlich ist. Der Traum von der Einheit bestand ja immer darin, dass die gesuchte Fundamentaltheorie so starke Bedingungen formuliert, dass nur ein einziges Universum sie tatsächlich erfüllen kann, nämlich unseres. Damit wäre, wie die Philosophen das nennen, alle Kontingenz nomologisch reduziert. Andere Welten könnten dann noch als logische, aber nicht als physikalische Möglichkeiten existieren.

Die Konstante Lambda (λ) macht wohl am deutlichsten einen Strich durch diese Rechnung. Es sieht nicht danach aus, dass irgendeine Fusion von Relativitätstheorie und Quantenmechanik oder auch die Stringtheorien den kleinen Wert von λ, der, an den Supernovae festgestellt, die Beschleunigung der Expansion bewirkt, erklären kann.

So bleibt offenbar nur die Möglichkeit, λ als versteckten anthropischen Selektionseffekt zu deuten. Dieser kann dann aber über eine Vielweltendeutung zumindest rational eingeordnet werden. Genz macht sehr klar, dass auch eine Vielweltendeutung der kontingenten Elemente der Kosmologie nicht unwissenschaftlich sein muss. Die Hypothese des Multiversums ist zwar nicht direkt überprüfbar, könnte aber gleichwohl erklärende Kraft für sonst als zufällig oder unintelligibel anzusehende Kontingenzen der Welt besitzen. Damit ist sie auch in Einklang mit dem ontologischen Sparsamkeitsprinzip (»Ockhams Rasiermesser«), denn dies besagt nur, dass so wenig Entitäten anzunehmen sind, wie zum Verständnis der Phänomene notwendig ist, aber nicht weniger. So kann man der Vielweltenhypothese gegenwärtig durchaus den Status einer rationalen, indirekt gestützten theoretischen Vermutung zuschreiben, die in absehbarer Zeit zum Standardmodell der Kosmologie avancieren könnte. Dies scheint wohl auch die Vermutung des Autors zu sein.

Das Einzige, was man an diesem dicht geschriebenen und informativen Buch aussetzen kann, ist der Titel. Genz erteilt allen kreationistischen Ideen und transzendenten Planungshypothesen eine deutliche Absage. Da Theologen ihre Bestätigungsinstanzen für eine supernaturalistische Deutung gerne an einzelnen Formulierungen festmachen, dürfte die Überschrift des Buchs einige Leser in die Irre führen. Genz beantwortet die Titelfrage mit einem klaren Nein.

Insgesamt ist das Buch in jeder Hinsicht zu empfehlen, erfordert allerdings eine gewisse Vertrautheit mit den laufenden kosmologischen Argumentationen.

Bernulf Kanitscheider

Der Rezensent ist Professor für Wissenschaftstheorie in Gießen.

Henning Genz
War es ein Gott?
Zufall, Notwendigkeit und Kreativität in der Entwicklung des Universums
Hanser, München 2006. 216 Seiten, € 19,90

PHYSIK

Wissenschaftliche Selbstbegrenzung

Durch ihren Anspruch auf Objektivität schränkt die Naturwissenschaft ihren eigenen Gültigkeitsbereich ein – und lässt damit in den Augen des Autors sogar Platz für die Religion.

Es geht in diesem Buch um nichts weniger als das, was die Welt im Innersten zusammenhält. Und auf der Suche danach spricht Gerhard Börner nicht nur Relativitätstheorie, Astronomie und Kosmologie an, sondern auch die Elementarteilchen und die Quantentheorie bis hin zur Stringtheorie. Der Autor kennt sich aus: Er ist Professor für Physik an der Universität München und Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, wo er sich der Erforschung des frühen Universums und der Galaxienentstehung widmet.

Da reicht Abiturwissen nicht immer aus. So wird die Lektüre dieses Buchs zu einem Blick in das Weltall mit leuchtenden Sternen, die auch dem Laien ins Auge springen, Dunkler Materie, die nur dem Kenner etwas sagt, und Sternschnuppen, die plötzlich und unerwartet vom Himmel fallen. So hätte Börner bei der Planck-Energie doch in einem Nebensatz erklären können, dass hier eine Grenze für die Anwendbarkeit der Naturgesetze vorliegt. Zu den Sternstunden zählen eine gelungen illustrierte Zusammenfassung der Speziellen Relativitätstheorie und die Zeitrafferaufnahme der Entwicklung des Universums: Drängt man den kaum vorstellbaren Zeitraum von 14 Milliarden Jahren auf ein Jahr zusammen, dann formt sich unser Sonnensystem etwa Mitte August, und Säugetiere zeigen sich ab dem 25. Dezember.

Wie sieht es nun dabei aus mit »Schöpfung ohne Schöpfer«? Der Autor will sich gar nicht anmaßen, die Titelfrage beantworten zu können. Immer wieder betont er, dass sich Natur- und Geisteswissenschaften unterschiedlicher Methoden bedienen und man die Fragen aus einer Disziplin nicht mit Methoden der anderen beantworten darf. Charakteristisch für die Naturwissenschaften ist das Unterfangen, die Welt objektiv zu beschreiben, das Subjekt also auszuklammern, während es in den Geisteswissenschaften gerade um die Erfahrungen des Subjekts geht. Allerdings hat die Physik gerade in der Quantenmechanik im letzten Jahrhundert ihre eigenen Grenzen aufgezeigt, denn in der Kopenhagener Deutung der Quantentheorie ist es der Akt der Beobachtung durch den Physiker als Subjekt, der darüber entscheidet, ob sich die Wellen- oder Teilchennatur der Materie zeigt.

Aber gerade weil die Physik selbst ihre eigenen Grenzen aufzeigt, sieht der Autor die Chance zum Brückenschlag hin zur Religion, ohne dass Letztere ständig in Konflikt mit einem deterministisch-kausalen Weltbild treten müsste. Am Ende will er die Frage »Schöpfung ohne Schöpfer?« jedenfalls nicht mit »Ja« beantworten. Das macht ihn irgendwie sympathisch; es wäre auch nicht anders zu erwarten gewesen von einem Schüler des Physikers und Nobelpreisträgers Werner Heisenberg (1901 – 1976).

Die Grenzen der Naturwissenschaften liegen vor unseren Augen: Noch ist es nicht

gelungen, Quantentheorie und Relativitätstheorie in Einklang zu bringen; Kosmologen erklären die Entwicklung des Weltalls nach dem Urknall, aber nicht den Urknall selbst. Bei der Frage nach der Entstehung des Lebens sind Naturwissenschaftler weit vorgestoßen, aber noch nicht am Ziel angelangt. Schuld an diesen Grenzen ist nicht etwa ein Mangel an Forschungsmitteln und an Köpfen wie Einstein. Die Naturwissenschaft begrenzt sich selbst durch ihr Bestreben, objektiv zu sein.

Darf eine objektivierende Wissenschaft überhaupt Stellung nehmen zu Fragen nach Geist und Bewusstsein? Deren Existenz zu leugnen, scheint eine allzu pragmatische Lösung zu sein, denn eine Mozart-Symphonie – um nur ein Beispiel zu nennen – ist doch viel mehr als eine Folge von Druckwellen auf unserem Trommelfell. Und wie könnte ein Physiker Theorien entwickeln, ohne sich physikalische Vorgänge *bewusst* zu machen? Wer Grenzen überschreitet, spekuliert. Und Spekulieren ist erlaubt! Es kann sogar intellektuelles Vergnügen bereiten, wenn es physikalisch begründet ist, anstatt den gesunden Menschenverstand zu verletzen.

Gerhard Börner lädt dazu ein: In einer Art Zusammenführung von Quantenmechanik und Darwin'scher Evolutionstheorie zeichnet er ein Bild, in dem »Schöpfung« die Erschaffung eines Raums von Möglichkeiten ist. In diesem zunächst zeitlosen Raum befinden sich einander benachbarte Zustände oder Konfigurationen, die sich, durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmt, zufällig realisieren. Zukünftige Zustände werden aus der Nachbarschaft der gerade realisierten Konfiguration ausgewählt. Auch die Seele oder das Göttliche finden als »seltsame Attraktoren« Platz in diesem Bild – beliebig nah erreichbar und doch nicht deterministisch zu erfassen.

Ein bisschen Geduld braucht man, um sich zu den Sternstunden des Buchs durchzuarbeiten, denn nicht alle Abschnitte zur Astronomie sind didaktische Meisterwerke. Aber die Mühe lohnt sich, weil es etwas zu staunen und viel Geist-Volles zu entdecken gibt.

Sabine Stöcker

Die Rezensentin ist Physikerin und promovierte Mathematikerin. Am Weizmann-Institut in Rehovoth (Israel) betreut sie eine Gruppe mathematikbegeisterter Kinder.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Gerhard Börner
Schöpfung ohne Schöpfer?
Das Wunder das Universums
Deutsche Verlags-Anstalt, München 2006.
216 Seiten, € 19,90

CHEMIE

Nicht nur, wenn es stinkt und kracht

Herbert Roesky will vor allem vermitteln, dass die Chemie auch künstlerisch-ästhetische Seiten aufzuweisen hat.

Nach seinem preisgekrönten Werk »Chemische Kabinettstücke« (1996) und unzähligen Experimentalvorträgen bietet Herbert Roesky, Professor für Anorganische Chemie in Göttingen, nun weitere 86 teils laute, teils farbenfrohe Experimente.

Fluorescin, Kongo Rot, Indigo Karmin und Methylenblau, mit der Pipette in Wasser getropft, ergeben wilde Farbkompositionen.

Roesky beschreibt die Durchführung jedes Versuchs sehr detailliert, weist eindringlich auf Gefahren hin, erklärt, was geschehen sollte – an einigen Stellen unterstützt durch Farbbilder –, und versäumt nicht, darauf hinzuweisen, wie man am Ende die chemischen Abfälle entsorgt. Passend zu jedem Versuch bringt er geistreiche Zitate und Anekdoten verschiedener Natur- und Geisteswissenschaftler, die sich zum Zitieren bei der Vorführung des Experiments eignen.

Die Bandbreite der Experimente reicht von Versuchen zu Wasser, Chemilumineszenz und Farben (Bild links) bis hin zu spektakulären Erscheinungen durch Selbstorganisation, die letztlich in eine chemische Kunstgalerie münden. Zwischendurch kommen die Freunde des Knalleffekts zu ihrem Recht: In »Die besondere Rakete« erfährt man, wie eine PET-Flasche, gefüllt mit einem Pentan-Sauerstoff-Gemisch, durch elektrische Zündung an einer Schnur quer durch den Raum schießt. Empfindlichen Leuten empfiehlt der Autor, während des Versuchs Ohrstöpsel zu tragen. Der Titel »Donnerschlag« beschreibt zutreffend die Reaktion von metallischem Kalium mit Pentachlorethan. Anschließend nicht vergessen: »Für den nächsten Versuch müssen die feinen Glasscherben des Reagenzglases aus dem Eisenrohr entfernt werden …« Und dass der Umgang mit »S_4N_4 – ein Muntermacher« ein gewisses Maß an Fingerspitzengefühl erfordert, leuchtet einem spätestens dann ein, wenn es auf einen Hammerschlag hin explosionsartig zerfällt. »Von der Explosion, die ich in meiner Vorlesung gehabt habe, hast Du wohl schon gehört. Die Wunden sind geheilt, und wir sind eminent interessant geworden«, zitiert Roesky aus einem Brief Justus von Liebigs (1853).

Wer eine ruhigere Atmosphäre bevorzugt, kommt mit errötendem Pfefferminztee auf seine Kosten. Das darin enthaltene Chlorophyll zeigt eine rote Lumineszenz, sobald es Energie von angeregten CO_2-Molekülen übertragen bekommt. Die Chemilumineszenz von Luminol im Versuch »Geisterstunde« ist ein Klassiker unter den chemischen Schauexperimenten, aber hier leuchtet der organische Farbstoff auf Grund spezieller Bedingungen oszillierend auf.

Auch alltägliche Schulversuche hat Roesky künstlerisch inszeniert. Während bei der

Fällung von Silberchlorid in der Schule meist nur ein weißer Niederschlag im Reagenzglas zu beobachten ist, lässt Roesky Chlorwasserstoff über die Gasphase aus einem als Schablone dienenden Filterpapier in eine Lösung mit Silberionen gelangen, woraufhin das Silberchlorid sich zum Beispiel in konzentrischen Kreisen niederschlägt. Und mit Hilfe einer geeigneten Apparatur kommt Ammoniumchlorid-Rauch aus einer paffenden Pfeife.

Zu Hause sollte man diese Experimente besser nicht durchführen; ein einigermaßen ausgestattetes Labor ist schon notwendig. Das beschränkt die Zielgruppe des Buchs vornehmlich auf Lehrer oder Dozenten; aber es eignet sich auch für Chemiestudenten und interessierte Schüler – wenn sie Zugang zu einem Labor finden. Obgleich viele Versuche aus Sicherheitsgründen dem Lehrer vorbehalten bleiben müssen, finden sich auch Experimente, die ein Schüler durchführen kann und die sich gut in Oberstufenthemen wie Farbstoffe/Farbigkeit oder Elektrochemie eingliedern lassen. Die Stromquelle, bestehend aus einer leeren Bierdose, Kochsalzlösung und einer Kohleelektrode, hat wie auch viele der anderen Experimente einen Alltagsbezug.

Manche der benötigten Chemikalien, wie flüssiges Ammoniak, Tetrakis(dimethylamino)ethen (TDAE) und diverse Goldverbindungen, sind für gewöhnlich in schulischen Chemiesammlungen nicht zu finden und mit Schulmitteln auch nicht herzustellen. Zudem sind manche Versuche richtig gefährlich und sollten nur von erfahrenen Experimentatoren durchgeführt werden. Denn wie schon der im Buch zitierte Goethe sagte:

»Wer sie nicht kennte,
die Elemente,
ihre Kraft
und Eigenschaft,
wäre kein Meister
über die Geister.«

Fertigen Sie auf alle Fälle von jeder Seite des Buchs eine Sicherheitskopie an. Bis die ersten Seiten vom Experimentieren in Mitleidenschaft gezogen werden, ist nur eine Frage der Zeit.

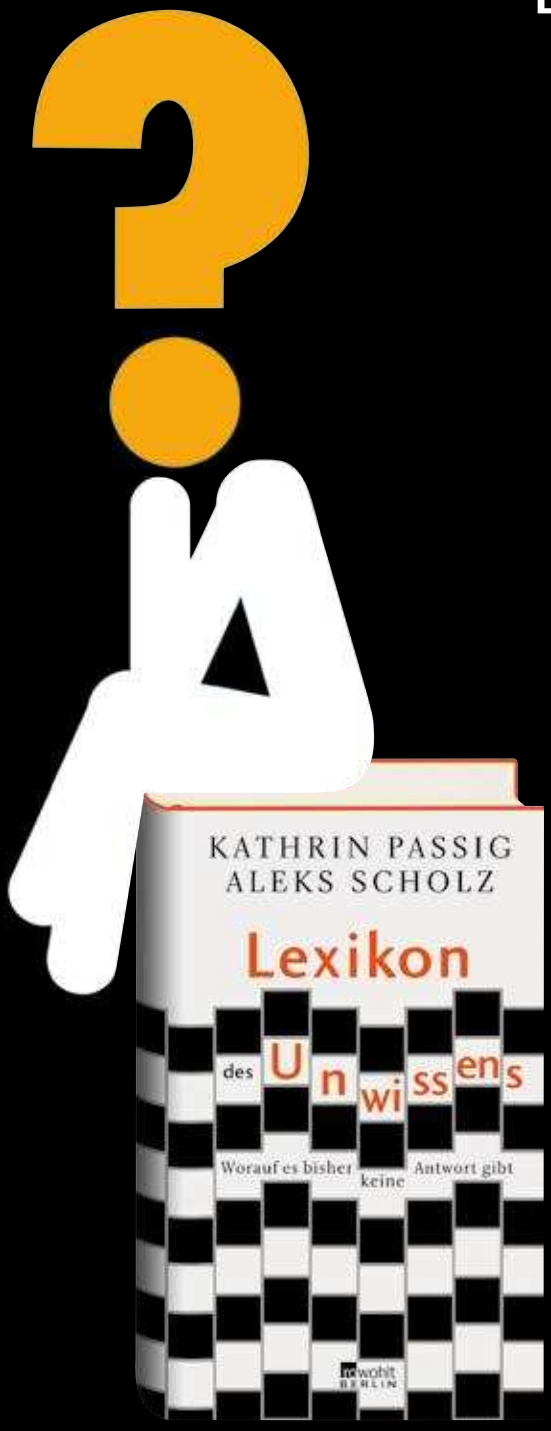
Kathrin Daub

Die Rezensentin promoviert am Institut für Anorganische Chemie der Universität zu Köln über Selten-Erd-Halogenide.

Herbert W. Roesky
Glanzlichter chemischer Experimentierkunst
Wiley-VCH, Weinheim 2006.
236 Seiten, € 29,90

www.rowohlt-berlin.de

rowohlt BERLIN



© Angela Jakob

256 Seiten. Gebunden. € 16,90

Lesen, worüber alle noch grübeln.

Das einzige Buch, nach dessen Lektüre Sie weniger wissen als zuvor und trotzdem schlauer sind: Kathrin Passig und Aleks Scholz über die Wissenslücken dieser Welt.

VORSCHAU

Heft Januar 2008
ab 21. Dezember im Handel

Kilimandscharo bald eisfrei

Wie die meisten Gletscher weltweit schwindet auch die Eiskappe auf dem höchsten Berg Afrikas. Anders als vielfach behauptet, ist in diesem Fall allerdings nicht die globale Erwärmung schuld

GEORG KASER

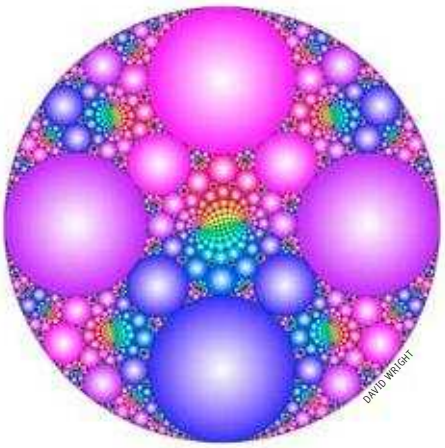
WEITERE THEMEN IM JANUAR

Was passiert im Bewusstsein?

Zwei prominente Hirnforscher debattieren über das neuronale Korrelat von Bewusstseinsprozessen

Neue Heimat Italien

Sie lehrten Etrusker und Römer die feine Lebensart – griechische Kolonisten gründeten auf italischem Boden boomende Stadtstaaten



DAVID WRIGHT

Fraktale Perlen

Wie lassen sich unendlich viele Kreise dicht an dicht und mit selbstähnlicher, also fraktaler Struktur in einen Kreis packen? Moderne Mathematik liefert die Antwort

ILLUSTRATION: AURORE SIMONNET, SONOMA STATE UNIVERSITY, ERO UND NASA

Hell wie tausend Galaxien

Die gigantische Leuchtkraft von Quasaren stellte Forscher lange vor große Rätsel. Dass sie auch eine zentrale Rolle für die Entwicklung von Galaxien spielen, wurde indessen erst in jüngerer Zeit entdeckt

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter